

**Jean-Paul CARNEIRO**

D.E.A. Physique et Technologie des Grands Instruments

Université de Paris XI

***ASPECTS MECANIQUES ET CRYOGENIQUES  
DU CRYOSTAT DE CAPTURE DE T.T.F. :***



***CRYOCAP***

Stage du 1er Avril au 21 Juin 1996

**Institut de Physique Nucléaire d' Orsay - Service R. D. A.**

**Directeur de stage : Monsieur T. JUNQUERA**

## REMERCIEMENTS

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur T. JUNQUERA pour m'avoir accueilli dans son service et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour l'étude que je menais en collaboration avec Messieurs S. BUHLER et A. LE GOFF. Tous trois auront été d'une grande disponibilité pour répondre à mes nombreuses questions.

Je remercie tout particulièrement Monsieur S. BUHLER pour les nombreuses explications qu'il m'a apportées sur les aspects cryogéniques de ce rapport de stage.

Je remercie également Monsieur A. LE GOFF pour l'enthousiasme qu'il a su me communiquer lors de l'étude des aspects mécaniques.

Que Messieurs BLACHE, FOUAIDY et HAMMOUDI trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements pour la patience dont ils ont fait preuve pour satisfaire ma curiosité personnelle.

Je tiens à remercier enfin l'ensemble du service R.D.A. pour le soutien apporté à la réalisation de ce stage.

Votre collaboration à tous m'aura permis de faire de ce stage une expérience enrichissante.

# TABLE DES MATIERES

<b><u>INTRODUCTION</u></b>	<b>5</b>
<b>1. DESCRIPTION DE L' INJECTEUR DE TTF</b>	<b>6</b>
<b><u>1.1. Description de TTF</u></b>	<b>6</b>
<b><u>1.2. Description de l'injecteur de TTF</u></b>	<b>6</b>
1.2.1. Le canon	7
1.2.2. La colonne de pré-accélération	7
1.2.3. La cavité sub-harmonique	7
1.2.4. La cavité de capture	8
<b>2. DESCRIPTION DE CRYOCAP</b>	<b>10</b>
<b><u>2.1. Descriptif des sous-ensembles</u></b>	<b>10</b>
2.1.1. Enceinte à vide	10
2.1.2. Ecran 80 K	
2.1.3. Réservoir LHe	
<b><u>2.2. Instrumentation pour tests cryogéniques</u></b>	<b>12</b>
<b>3. ASPECTS MECANIQUES</b>	<b>13</b>
<b><u>3.1. Suspension du réservoir LHe</u></b>	<b>13</b>
3.1.1. Cahier des charges	13
3.1.2. Concept adopté	13
3.1.2.1. Etude du système de serrage	14
3.1.2.2. Etalonnage des jauges de contraintes	18
<b><u>3.2. Contraintes thermiques sur les tirants de suspension par la mise en froid</u></b>	<b>18</b>
3.2.1. Analyse des contraintes thermiques induites	18
3.2.2. Contraction thermique d'un matériau	21
3.2.3. Profil de température dans un tirant	21
3.2.4. Contraction globale d'un barreau avec un gradient de température $\Delta L_{con}$	22
3.2.5. Variation de la longueur géométrique $\Delta L_{geo}$	22
3.2.6. Contractions thermiques	22
<b><u>3.3. Conclusion : Traction des tirants à 300 K</u></b>	<b>23</b>

<b>4. ASPECTS THERMIQUES</b>	<b>24</b>
<b><u>4.1. Nature des flux thermiques</u></b>	<b>24</b>
4.1.1. Conduction	24
4.1.1.1. Conduction simple	24
4.1.1.2. Conduction avec thermalisation	24
4.1.2. Rayonnement	25
4.1.2.1. Cas général	25
4.1.2.2. Rayonnement à travers l'ouverture	26
<b><u>4.2. Estimation prévisionnelle des flux thermiques</u></b>	<b>26</b>
4.2.1. Récapitulatif global des flux thermiques	26
4.2.1.1. Tableaux récapitulatifs	27
4.2.1.2. Consommation de réfrigérants (états stationnaires)	27
4.2.2. Evaluation individuelle des flux 300 K → 80 K	31
4.2.3. Evaluation thermiques des flux 300 ou 80 K → 4 K	32
<b><u>4.3. Mise en froid</u></b>	<b>33</b>
4.3.1. Procédure de mise en froid	33
4.3.1.1. Mise en froid par réfrigérant associé	33
4.3.1.2. Mise en froid par l'emploi d'un cryofluide	34
4.3.2. Consommation de cryofluide	34
4.3.3. Vitesse de mise en froid	34
4.3.3.1. Ecran 80 K	34
4.3.3.2. Réservoir LHe	34
<b><u>4.4. Réchauffage du cryostat</u></b>	<b>35</b>
4.4.1. Réservoir LHe	35
4.4.2. Ecran 80 K	35
<b><u>CONCLUSION</u></b>	<b>37</b>
<b><i>ANNEXES</i></b>	<b>38</b>
<b><i>BIBLIOGRAPHIE</i></b>	<b>48</b>

# INTRODUCTION

Au cours des dix dernières années, les collisionneurs  $e^+ / e^-$  L.E.P.-C.E.R.N. (100 ou 200 GeV) et S.L.C.-Stanford (100 GeV) ont dominé les recherches élémentaires sur la matière et la compréhension des interactions fondamentales. Pour pouvoir poursuivre ces recherches, il faut atteindre de plus hautes énergies.

C'est la raison pour laquelle un grand projet d'accélérateur linéaire  $e^+ / e^-$  de 500 GeV au centre de masse pourrait voir le jour dans les prochaines décennies. Ce projet est appelé TESLA (TEvatron Superconducting Linear Accelerator) et repose sur l'utilisation de cavités HF. supraconductrices fonctionnant à 1.3 Ghz et possédant un gradient de champ de 25 MV/m; ce projet viendrait compléter le programme de recherche effectué par le L.H.C. (p-p/16 TeV au centre de masse).

Dans l'état actuel des techniques, seuls les accélérateurs linéaires sont concevables pour accélérer des  $e^+ / e^-$  à de telles énergies car les accélérateurs circulaires entraîneraient des pertes par rayonnement synchrotron considérables, de sorte que leur taille serait prohibitive.

Pour établir les bases techniques de ce projet, les pays collaborateurs construisent à Hambourg un prototype TESLA Test Facility (T.T.F.) qui devra délivrer en 1997 deux faisceaux de 250 MeV.

La France participe au projet T.T.F. par l'intermédiaire de trois laboratoires :

- C.E.A./D.A.P.N.I.A./S.E.A. de Saclay
- IN2P3/I.P.N d'Orsay
- IN2P3/L.A.L d'Orsay

qui ont en charge la réalisation de l'injecteur de TTF.

La participation de l' I.P.N. au projet T.T.F. consiste en la réalisation d'un cryostat de capture "CRYOCAP" placé en bout de l'injecteur. Ce cryostat de capture comprend une cavité supraconductrice 9 cellules en niobium massif installée dans un réservoir d'LHe à 1.8 K.

Ce rapport présente, après une description de l'accélérateur TTF et du cryostat de capture, une étude mécanique et thermique effectuée sur Cryocap.

L'étude mécanique concerne les tirants de suspension du réservoir d'LHe et système de serrage.

Quant à l'étude thermique elle consiste en un inventaire des flux thermiques à l'intérieur de Cryocap pour aboutir à la consommation de réfrigérant nécessaire lors du fonctionnement en état stationnaire et lors de la mise à froid de Cryocap. Nous étudierons aussi la durée nécessaire à la remise à température ambiante de Cryocap.

# 1. DESCRIPTION DE L'INJECTEUR DE TTF

## 1.1. Description de TTF

TTF est un accélérateur linéaire  $e^+ / e^-$  fonctionnant à des énergies de 500 MeV. Il se compose d'un injecteur délivrant un faisceau d'électrons de 10 MeV et d'un linac comprenant 4 cryomodules de 12 mètres de long contenant chacun 8 cavités supraconductrices (→Fig 1./1).

Il délivre un faisceau d'électrons en mode "macro-pulsé". Les électrons sont regroupés en micro-impulsions de quelques picosecondes séparées entre elles par un intervalle de temps de 4,61 ns (216,7 Mhz). Chaque micro-impulsion dont l'intensité crête est de 125mA comprend  $2,3 \times 10^8$  électrons. Un train de ces micro-impulsions forme une macro-impulsion longue d'environ 0,8 ms séparées entre elles par un intervalle de temps de 0,1 s (10 Hz). Le courant instantané d'électrons à l'intérieur d'une macro-impulsion est de 8mA.(→Fig 1./1).

TTF utilise un gradient de champ accélérateur de 15 MV/m. Ce gradient peut être obtenu avec des cavités normales mais celles-ci entraîneraient des pertes HF considérables ( $> 40$  kW/m) et l'utilisation de klystrons de puissance supérieure à 4 MW. A cette solution, les ingénieurs ont préférés l'utilisation de cavités supraconductrices au niobium induisant des pertes HF  $< 1,3$  W et l'utilisation de klystrons de 206 kW.

Outre le surcoût qu'entraîne toute l'installation cryogénique, ces cavités supraconductrices introduisent des difficultés technologiques supplémentaires. L'une d'elles est que dans ce type de cavités les pertes de faisceau ne sont pas tolérées car elles entraîneraient des quenches qui détruiraient la phase supraconductrice. De façon à minimiser ces pertes et optimiser le rapport courant injecté / courant accéléré le faisceau doit être pré-découpé en paquets assez courts avant l'injection dans le LINAC

Le rôle de l'injecteur est de former et de pré-accéléré les paquets d'électrons avant l'injection dans le LINAC.

## 1.2. Description de l'injecteur de TTF

Il s'agit de la partie la plus délicate de l'accélérateur. Les électrons n'ayant que peu d'énergie, les forces de charge d'espace ont une influence sensible quant à la croissance de l'émission et au groupement des particules.

L'injecteur de TTF se compose d'un canon thermoionique, d'une colonne accélératrice, d'une cavité de pré-groupement et d'une cavité de capture.

### 1.2.1. Le canon

C'est un canon de type Pierce réalisé par Hermosa Electronics en Californie ; il s'inspire du modèle utilisé sur l'A.L.S de Saclay. Ses principaux paramètres sont donnés par le Tableau 1./1.

Tableau 1./1 : Paramètres des paquets à la sortie du canon

Tension nominale	30	kV
Intensité	400	mA
Fréquence des macro-impulsions	10	Hz
Durée des macro-impulsions	0,8	ms
Intervalle des micro-impulsions	4,61	ns
Durée des micro-impulsions	0.64	ns
Emittance ( $4\pi\beta\gamma\sigma\sigma'$ )	$15\pi$	mm mrad
Particules par micro-paquets	$2,3 \times 10^8$	

Les électrons de 30 keV pénètrent alors dans la colonne de pré-accelération.

### 1.2.2. La colonne de pré-accelération

Il s'agit d'une colonne électrostatique d'environ 1 mètre de long identique à celle utilisée sur l'accélérateur S-DALINAC de Darmstadt. Elle ajoute 220 keV aux électrons issus du canon; les électrons sortent donc de la colonne avec 250 keV.

En effet, pour que les électrons soient capturés, accélérés et groupés dans la cavité de capture il faut qu'ils aient une énergie  $\geq 200$  keV. Ce gain d'énergie permet également d'éviter les zones à fortes densités ("cross-over") responsables de la dégradation de l'émittance. Une énergie encore plus élevée à l'issue de la colonne de pré-accelération améliorerait ces deux points mais au prix de modifications technologiques à apporter sur la colonne de S-DALINAC qui ne peut pas délivrer dans son état actuel des électrons d'énergie supérieure à 300 keV.

### 1.2.3. La cavité sub-harmonique

Le rôle de cette cavité est de compresser les micro-impulsion de courant fournies par le canon et le tube électrostatique afin de les rendre compatible avec l'acceptance en phase de la cavité de capture à 1.3 Ghz.

Les micro-impulsions passent alors de 0,64 ns à moins de 0,1 ns à l'issue de la cavité sub-harmonique.

Pour cela, il suffit d'imposer une modulation de vitesse du faisceau, les premiers électrons étant freinés et les derniers accélérés. Le groupement s'effectue dans l'espace de glissement séparant la cavité sub-harmonique de la cavité de capture. Il doit être optimal à l'entrée de cette dernière.

La cavité utilisée est de type cylindrique à gap réentrant en acier inoxydable. Elle est alimentée par un klystron pouvant délivrer une puissance crête de 206 kW. Elle fonctionne en mode  $\pi$  à une fréquence de 216.7 Mhz, soit la 6<sup>ème</sup> sous harmonique de la fréquence de la cavité de capture.

## 2.4. La cavité de capture

La cavité de capture est une cavité supraconductrice en niobium massif de 9 cellules fonctionnant à 1.3 Ghz avec un gradient de champ accélérateur de 15 MeV/m identique aux 32 autres cavités utilisées dans le linac de TTF. Elle est alimentée par son propre klystron de 300 kW.

Ses 2 rôles fondamentaux sont :

1/ terminer le groupement des micro-impulsions initié par la cavité sub-harmonique. Les micro-impulsions qui ont une durée inférieure à 100 ps à l'entrée de la cavité seront compressées à moins de 10 ps.

2/ fournir l'énergie nécessaire (au moins 10 MeV) à l'injection dans le premier cryomodule du linac de TTF. Les particules subissent une importante variation d'énergie dans la cavité de capture puisqu'elles passent typiquement de 250 keV à 10 MeV.

La cavité résonne sur le mode fondamental  $TM_{010}$  à 1.3 Ghz car pour ce mode les seules composantes de champ non nulles sont  $E_z$  et  $H_\phi$ .  $E_z$  permet d'accélérer les particules suivant l'axe de la cavité et  $H_\phi$  permet de les focaliser suivant la même direction. La différence de phase à un instant donné et en deux intervalles successifs d'accélération (cellules) est de  $\pi$ ; ceci impose une distance  $\lambda/2$  entre chaque cellule ( $\rightarrow$ Fig1./3)

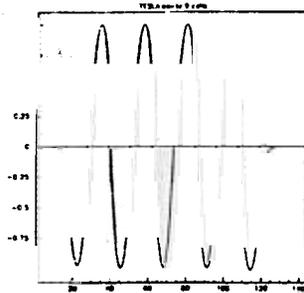


Fig1./3 : Distribution du champ électrique dans la cavité de capture

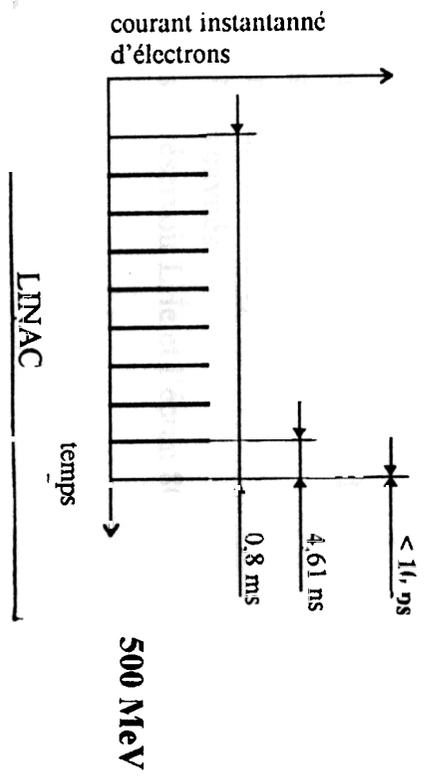
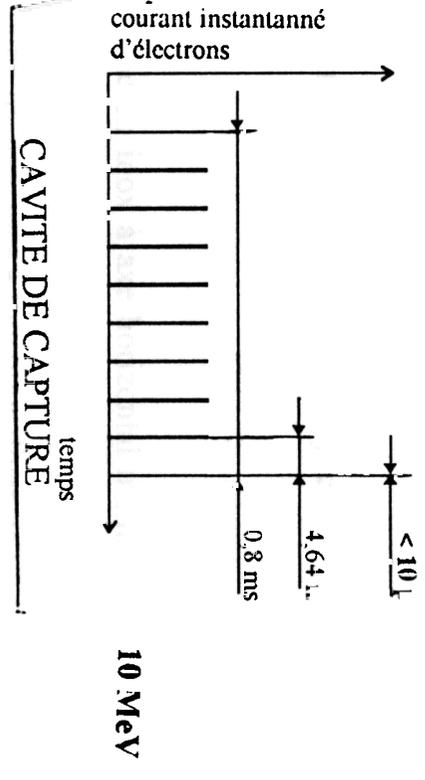
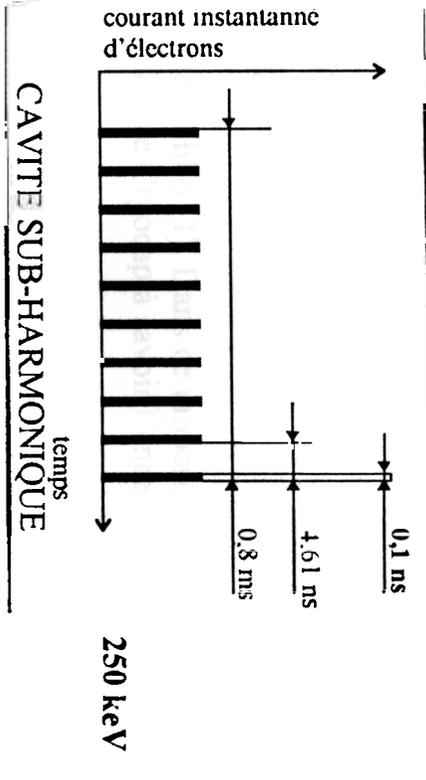
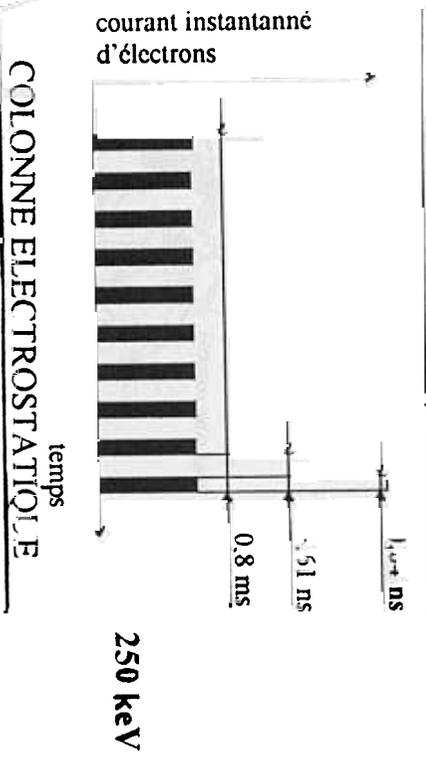
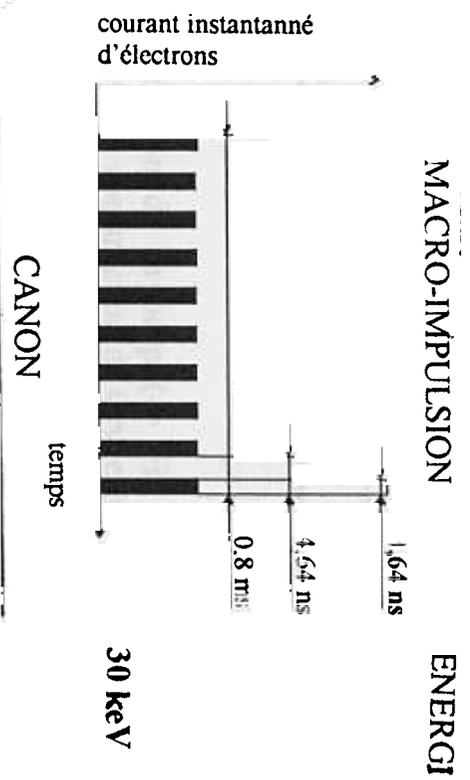
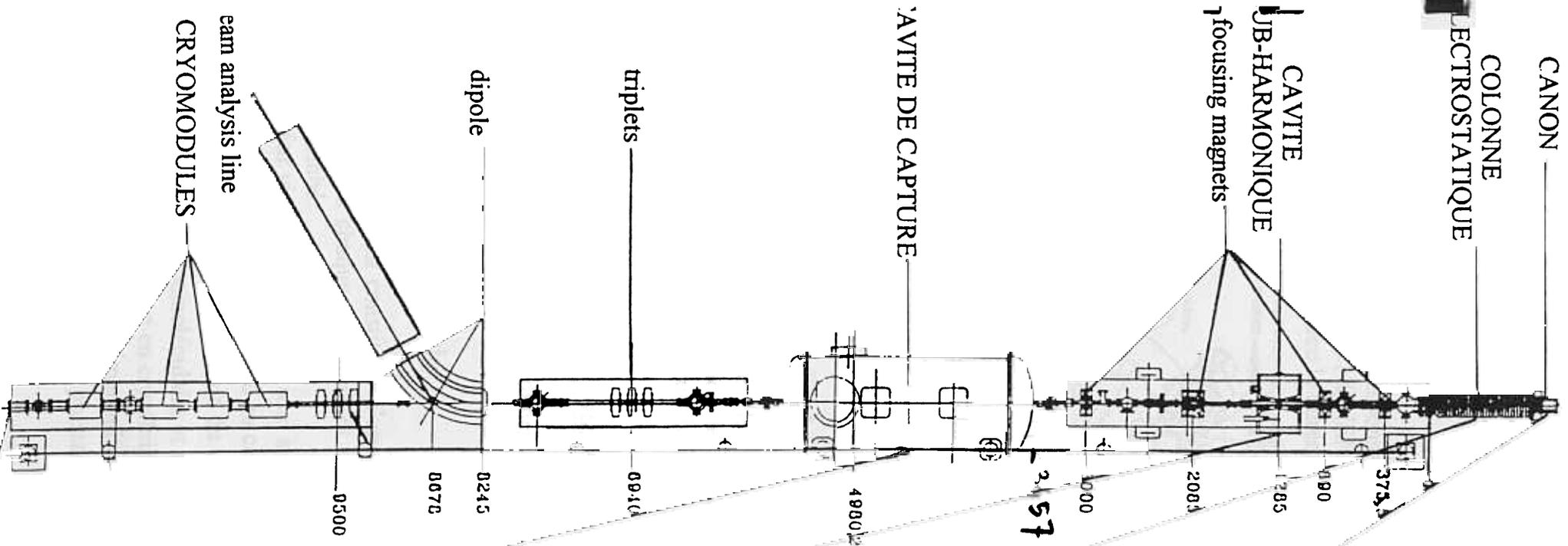
Le déphasage est ajusté de telle sorte que le champ électrique de la cavité de capture reste maximum lors du passage de la particule de référence. En revanche il accélère la particule se présentant en retard et décélère la particule se présentant en avance.

En jouant sur la distance entre la cavité de capture et le linac on conçoit qu'il soit possible d'augmenter le taux de captures initiales.

Le recours à la simulation numérique est inévitable pour estimer les paramètres de sortie des paquets.

Tableau 1./2 Paramètres des paquets à la sortie de la cavité de capture

Energie du faisceau	10 MeV
Fréquence des macro-impulsions	10 Hz
Durée des macro-impulsions	0,8 ms
Intervalle des micro-impulsions	4,61 ns
Durée des micro-impulsions	<10 ps
Courant crête	8 mA
Charges dans les micro-paquets	$3,7 \times 10^{-2}$ nC
Emittance ( $4\pi\beta\gamma\sigma\sigma'$ )	$0,9\pi$ mm mrad



## 2. DESCRIPTION DE CRYOCAP

Les ingénieurs responsables de la construction de Cryocap (→ Fig 2./1) sont S. BUHLER et T. JUNQUERA de l'IPN d'Orsay. La construction de Cryocap s'est faite en collaboration avec le bureau d'étude du LAL d'Orsay.

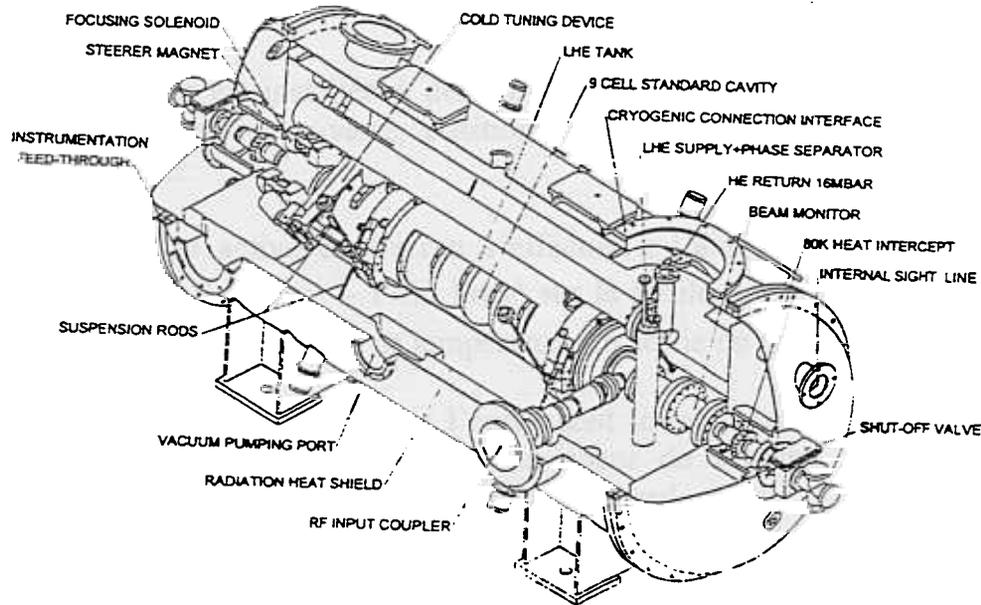


Fig 2./1 : Cryostat de capture "CRYOCAP"

Une description détaillée de Cryocap est présentée biblio [1]. Dans ce rapport, nous nous limiterons à la description des trois sous-ensembles de Cryocap à savoir l'enceinte à vide, l'écran 80K et le réservoir LHe.

### 2.1. Descriptif des sous ensembles

Fig2./2 donne les dimensions, superficies et masses essentielles de Cryocap.

#### 2.1.1 Enceinte à vide

Elle est constituée d'une virole cylindrique en inox à axe horizontal munie d'une bride à chaque extrémité et obturée par deux grands couvercles amovibles avec fond bombé.

Sur virole et couvercles sont aménagés de nombreux piquages à fonctions diverses :

- conduite du faisceau au centre des cavités
- réalisation et contrôle du vide d'isolation thermique ( $< 10^{-5}$  mbar) à l'aide d'une pompe turbomoléculaire et son équipement associé
- l'alimentation en cryofluide (arrivée et retour d'LN et d'LHe)
- les conduits d'alimentation et de contrôle HF des cavités
- les liaisons "filasse puissance + mesure" vers le réservoir LHe et l'écran 80 K.

### 2.1.2. Ecran 80 K

Une virole cylindrique en cuivre d'épaisseur 2 mm, réfrigérée par une circulation permanente d'LN, constitue un écran 80 K qui englobe le réservoir LHe et qui doit :

- protéger le réservoir LHe du flux radiatif de l'ambiante
- autoriser la thermalisation à 80 K des nombreuses liaisons conductives 300K → 4K et réduire ainsi leur flux conductif vers 4 K.

La virole écran est installée à demeure à l'intérieur de l'enceinte à vide où elle repose sur 4 pieds en époxy-verre, positionnée latéralement par un doigt de centrage venant de l'extérieur.

La réfrigération active de l'écran s'effectue à l'aide d'un conduit serpentin de  $\phi 10 \times 12$  mm et de longueur  $\sim 17$  m brasé sur la virole. Le débit d'LN réfrigérant est contrôlé et modulé en fonction de sa température en sortie du serpentin.

Les deux extrémités de la virole l'écran sont fermées par deux calottes en tôle de cuivre, amovibles à chaque intervention au coeur du cryostat. Leur refroidissement s'opère par conduction à travers le simple montage boulonné.

Pour réduire la charge thermique sur l'écran celui-ci est entièrement recouvert de 40 couches de superisolation. Pour réduire le rayonnement écran 80 K → réservoir LHe et pour préserver la qualité du cuivre l'écran est recouvert intérieurement d'une bande adhésive en aluminium.

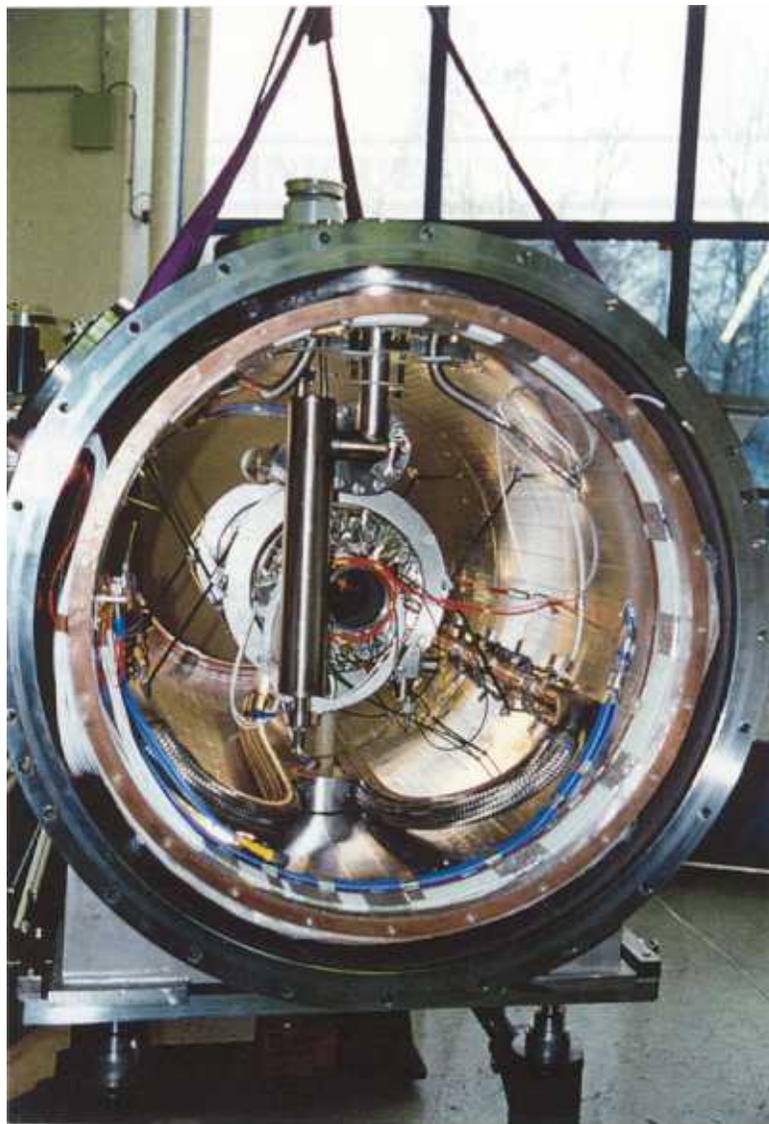
Le réchauffage naturel de l'écran en fin de manip peut être accéléré par une chaufferette électrique ( $\sim 2$  kW) du genre Thermocoax brasé sur la virole dont la température est limitée par un thermocontact à  $+40$  °C.

### 2.1.3. Réservoir LHe

Le réservoir LHe se présente comme un fût horizontal à l'intérieur duquel demeure la cavité 9 cellules. L'originalité du réservoir LHe des cavités TESLA est son faible volume d'hélium et surtout l'ensemble de joints critiques entre les coupleurs et la cavité (isolateurs céramiques) qui ne sont pas en contact avec l'hélium. Tous les coupleurs et antennes sont placés dans le vide d'isolement et sont thermalisés par conduction.

Son support s'effectue à partir de l'enceinte à vide par une suspension en filaments époxy-verre à savoir  $2 \times 4$  tirants en suspensions radiales et antagonistes. Cette suspension autorise un petit ajustement initial de l'axe horizontal du cryostat qui ne devrait plus se déplacer, notamment lors de la mise en froid, à cause de la suspension antagoniste des tirants de suspension.

L'ensemble des cavités avec son support s'enfourme au montage sur deux rails solidaires du réservoir.



	Matériau	Superficie	Vol inter	Masse
Enceinte à vide	Inox	5,44 m <sup>2</sup>	1 m <sup>3</sup>	215 kg
Ecran 80 K	Cuivre	4,7 m <sup>2</sup>		85 kg
Réservoir LHe	Inox	0,27 m <sup>2</sup>	0,05 m <sup>3</sup>	30 kg

Fig2./2 : Dimensions, superficies et masses essentielles de CRYOCAP.

## **2.2 Instrumentation pour tests cryogéniques**

L'implantation définitive de Cryocap prévoit son raccordement sur une ligne cryogénique les reliant à un liquéfacteur-réfrigérateur qui refroidira l'écran 80K avec de l'He gas. Pour les essais cryogéniques à l'IPN d'Orsay, Cryocap sera alimenté à partir de bouteilles d'LN et d'LHe installées à proximité.

## 3. ASPECTS MECANIQUES

Cette partie consiste en l'étude des tirants de suspension qui supportent le réservoir LHe.

Nous allons tout d'abord étudier dans le § 3.1 le système de serrage de ces tirants. Nous déterminerons le type de rondelles le mieux adapté pour ce système de serrage (§ 3.1.2.1) puis nous ferons l'étalonnage des jauges de contraintes en utilisant ces rondelles (§ 3.1.2.2).

Ensuite, dans le § 3.2, nous calculerons la contrainte thermique subit par les tirants de suspension lors de la mise à froid.

Connaissant le seuil de rupture des tirants nous déterminerons, dans le § 3.3, la force avec laquelle doivent être tendus les tirants à 300 K.

### 3.1. Suspension du réservoir LHe

#### 3.1.1. Cahier des charges

La suspension du réservoir LHe dans l'enceinte à vide doit satisfaire les exigences suivantes :

- supporter la masse du réservoir LHe avec la cavité au centre du cryostat
- régler, puis immobiliser l'axe virtuel du faisceau en toutes circonstances
- régler, puis immobiliser le plan médian du cryostat, perpendiculaire à l'axe du faisceau
- assurer une bonne rigidité de la suspension en présence d'un effort perturbateur (transversal, longitudinal et en rotation)
- minimiser le flux de chaleur par conduction
- réduire, autant que possible, d'éventuelles contraintes thermiques induites

#### 3.1.2. Concept adopté

Fig 2./2 et 3./2 illustrent le principe du système de suspension

- a) 2×2 tirants verticaux orientés vers le bas supportent la masse du réservoir
- b) 2×2 tirants verticaux orientés vers le bas empêchent le déplacement de l'axe horizontal du cryostat lors de la mise en froid

Les tirants sont des cylindres en époxy-verre de 6.6 mm de diamètre et de 449 mm de long (→ Fig 3./1b). Aux extrémités de chaque tirants se trouve un système de fixation en inox et une tige filetée en inox de 15 mm de diamètre.

- Les tirants sont fixés à l'aide d'une goupille sur deux arceaux espacés de 70 cm qui entourent le réservoir LHe.

- A l'autre extrémité, les tirants sont fixés sur l'enceinte à vide. La tige filetée de chaque tirant sort de l'enceinte à vide par l'intermédiaire d'une bride. Un système de serrage vient se fixer sur chaque tige filetée permettant de tendre les tirants et d'effectuer le réglage en position et l'alignement du réservoir LHe. Ce système de serrage fait l'objet d'une étude particulière.

### 3.1.2.1. Etude du système de serrage

Le système de serrage → Fig 3./1c ) se compose

- d'une rondelle concave en inox de 48 mm de diamètre qui s'appuie sur la bride
- d'une rondelle convexe en laiton de 48 mm de diamètre qui s'encastre dans la rondelle concave.
- d'une jauge de contraintes en aluminium 4G de 45 mm de diamètre qui s'encastre dans la rondelle convexe en laiton
  - d'un jeu de rondelles de 30 mm de diamètre qui s'appuie sur la jauge de contraintes.
  - d'un écrou en bronze de 24 mm de diamètre.

Les brides sur lesquelles sont fixées les tirants entravent tout mouvement de rotation de ces derniers. Le serrage de l'écrou engendre alors deux forces :

- **une force axiale** qui va permettre de tendre le tirant (→ **Force utile**)
- **une force de torsion** créée par le frottement de l'écrou sur le jeu de rondelles (→ **Force nuisible**)

Nous avons entrepris l'étude de 3 types de jeux de rondelles *non lubrifiées* de façon à déterminer de ces 3 jeux celui qui permet d'obtenir la plus importante force axiale.

Ces trois jeux de rondelles sont :

- une rondelle concave / une rondelle convexe en ACIER-INOX 316L
- une rondelle concave / une rondelle convexe en ACIER-TREMPE  $R_{\sqrt{0.8}}$
- une rondelle BUTEE A ROULEAUX comprenant une rondelle plate en Acier-inox de part et d'autre.

Pour cela nous avons réalisé un montage semblable à celui de Cryocap en installant un tirant horizontalement sur une machine à fraiser ( → Fig 3./1a).

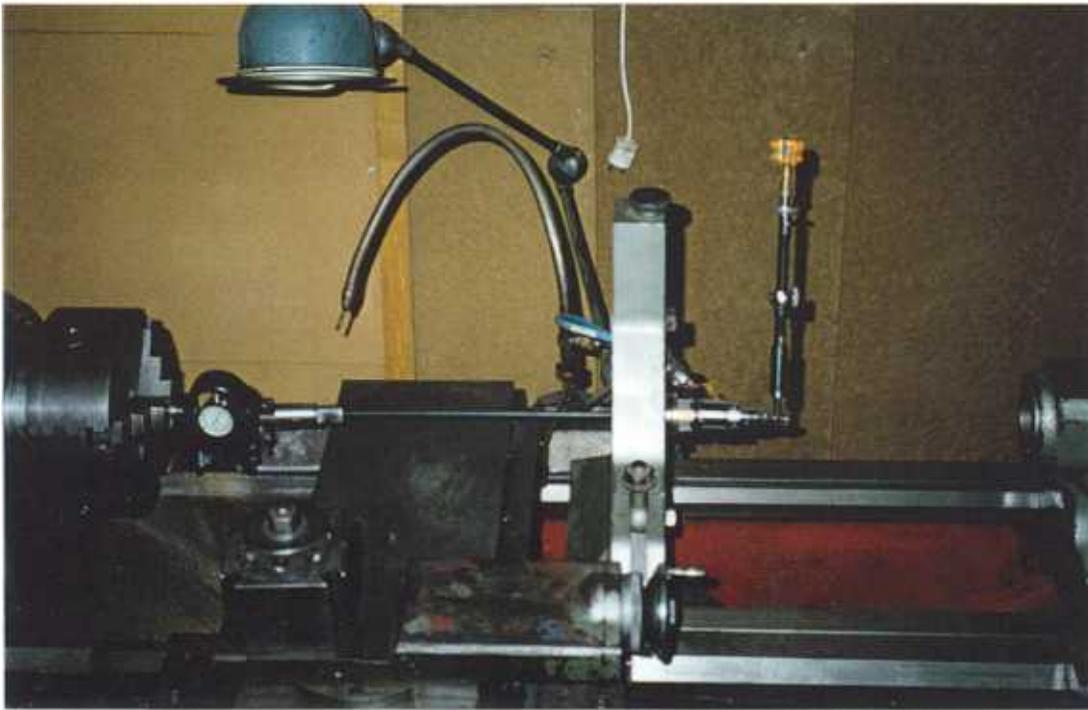
Nous avons fixé un dynamomètre sur le tour et goupillé le tirant sur le dynamomètre. Ce dynamomètre lit la force axiale subit par le tirant.

A l'autre extrémité du tirant une pièce en acier est fixée sur la machine à fraiser et laisse dépasser en son centre la partie filetée du tirant. Cette pièce joue le rôle de la bride sur l'enceinte c'est à dire qu'elle entrave tout mouvement de rotation du tirant mais permet à celui ci de se déplacer longitudinalement.

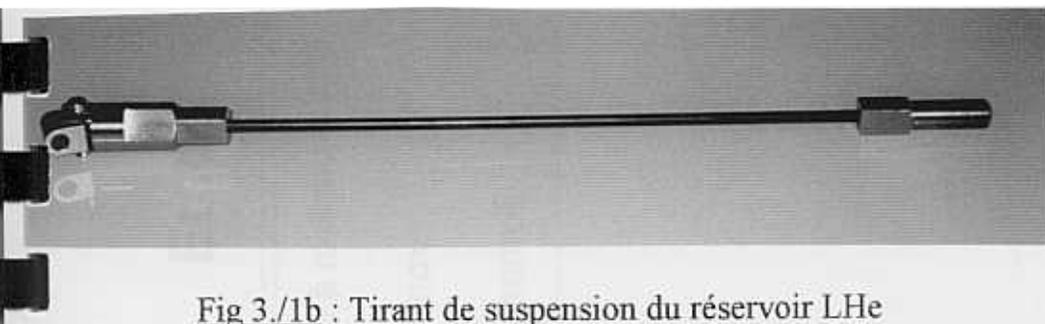
Sur la partie filetée du tirant nous avons positionné le système de serrage en y installant consécutivement les trois types de jeu de rondelles décrit ci-dessus.

Pour chacun d'eux nous avons déterminé l'effort axial lu sur le dynamomètre en fonction du couple appliqué lors du serrage de l'écrou par une clef dynamométrique (→ graphe 3./1).

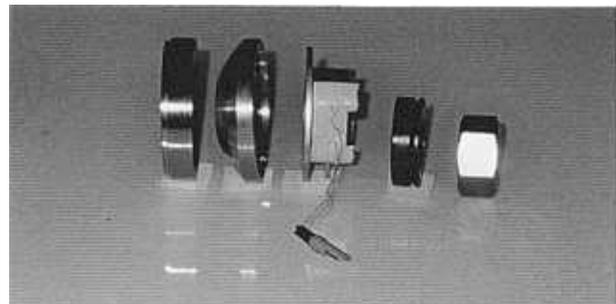
**Fig 3./1** : Etude du système de serrage des tirants de suspension du réservoir LHe



**Fig 3./1a** Montage dynamomètre + tirant + système de serrage sur une machine à fraiser



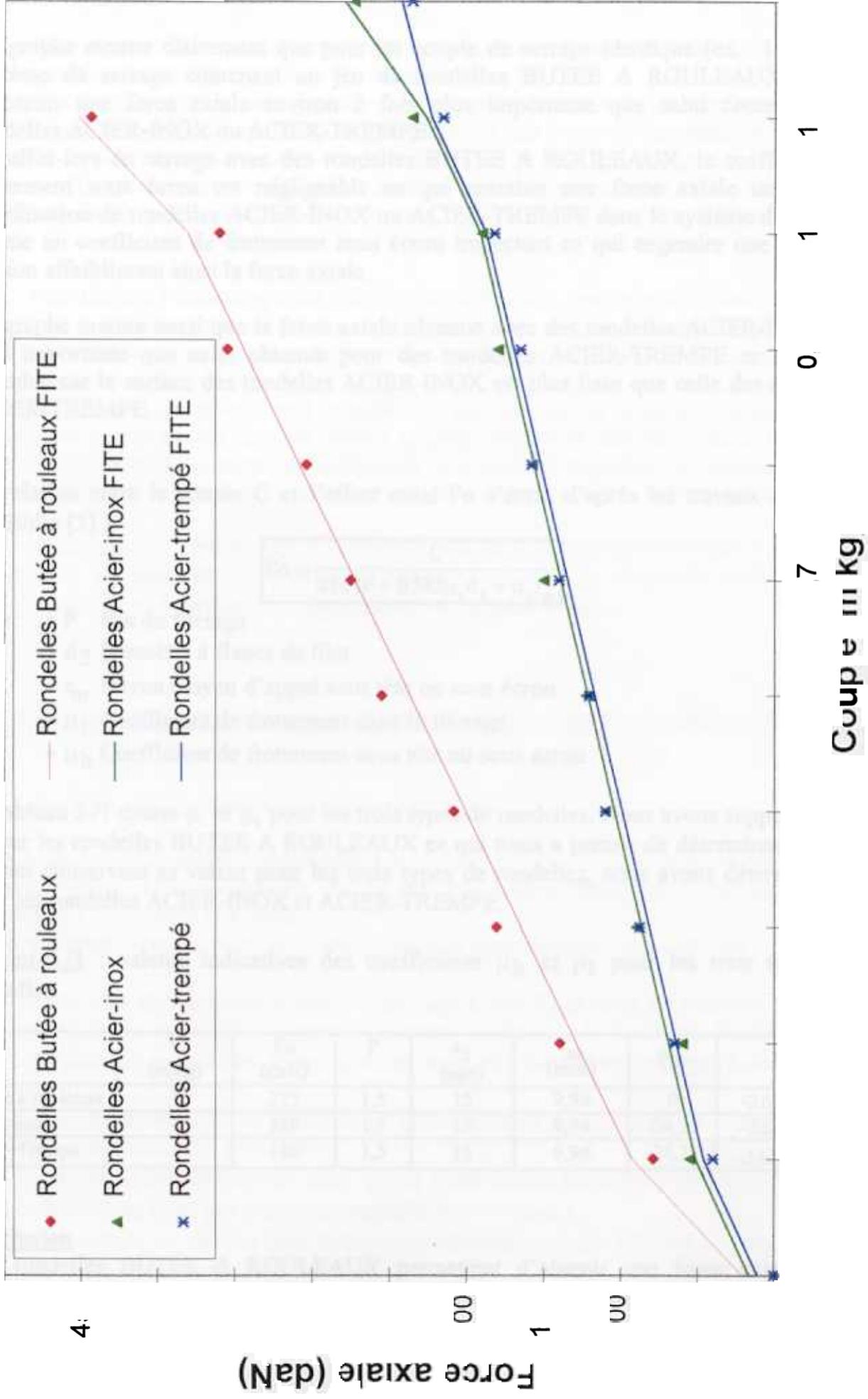
**Fig 3./1b** : Tirant de suspension du réservoir LHe



**Fig 3./1c** : Système de serrage des tirants de suspension sur Cryocap

Graphe 3./1

## Etude de trois types de rondelles



### interprétation du graphe 3./1

Ce graphe montre clairement que pour un couple de serrage identique (ex : 1m/kg), le système de serrage contenant un jeu de rondelles BUTEE A ROULEAUX permet d'obtenir une force axiale environ 2 fois plus importante que celui contenant des rondelles ACIER-INOX ou ACIER-TREMPE.

En effet lors du serrage avec des rondelles BUTEE A ROULEAUX, le coefficient de frottement sous écrou est négligeable ce qui entraîne une force axiale importante. L'utilisation de rondelles ACIER-INOX ou ACIER-TREMPE dans le système de serrage amène un coefficient de frottement sous écrou important ce qui engendre une force de torsion affaiblissant ainsi la force axiale.

Ce graphe montre aussi que la force axiale obtenue avec des rondelles ACIER-INOX est plus importante que celle obtenue pour des rondelles ACIER-TREMPE ce qui était attendu car la surface des rondelles ACIER-INOX est plus lisse que celle des rondelles ACIER-TREMPE.

La relation entre le couple C et l'effort axial Fo s'écrit, d'après les travaux de Klein (→Biblio [2] )

$$F_o = \frac{C}{0.161P + 0.583\mu_t d_2 + \mu_h r_m}$$

- avec
- P Pas du filetage
  - $d_2$  Diamètre à flancs de filet
  - $r_m$  Rayon moyen d'appui sous tête ou sous écrou
  - $\mu_t$  Coefficient de frottement dans le filetage
  - $\mu_h$  Coefficient de frottement sous tête ou sous écrou

Le tableau 3./1 donne  $\mu_t$  et  $\mu_h$  pour les trois types de rondelles. Nous avons supposé  $\mu_h = 0$  pour les rondelles BUTEE A ROULEAUX ce qui nous a permis de déterminer  $\mu_t$ . Ce dernier conservant sa valeur pour les trois types de rondelles, nous avons déterminé  $\mu_h$  pour les rondelles ACIER-INOX et ACIER-TREMPE.

tableau 3./1 valeurs indicatives des coefficients  $\mu_h$  et  $\mu_t$  pour les trois types de rondelles.

	C (m/kg)	Fo (daN)	P	$d_2$ (mm)	$r_m$ (mm)	$\mu_h$	$\mu_t$
Butée à rouleaux	1	275	1,5	15	9,94	0	$-3,62 \times 10^{-2}$
Acier-inox	1	139	1,5	15	9,94	-24,25	$-3,62 \times 10^{-2}$
Acier-Trempe	1	136	1,5	15	9,94	-24,25	$-3,62 \times 10^{-2}$

### **conclusion**

Les rondelles BUTEE A ROULEAUX permettent d'obtenir une force axiale plus importante que leurs concurrentes; elles seront donc installées dans le système de serrage de Cryocap.

### ***3.1.2.2. Etalonnage des jauges de contraintes***

Pour assurer l'immobilisation du réservoir LHe lors de la mise à froid, les 8 tirants de suspension doivent être tendus avec la même force axiale.

Afin de déterminer cette force et pour ne pas dépasser la limite de contraction thermique lors de la mise en froid (contrainte supplémentaire) une jauge de contrainte est installée sur chacun des 4 tirants de suspension orientés vers le haut qui supportent la masse du réservoir. Cryocap étant un ensemble à symétrie cylindrique, la force axiale subit par les 4 tirants orientés vers le bas sera la même que celle subit par les 4 tirants orientés vers le haut.

Pour réaliser l'étalonnage des 4 jauges de contraintes, nous avons réalisé le montage décrit au § 3.1.2.1. Le système de serrage comprend un jeu de rondelles BUTEE A ROULEAUX de façon à ce que la force appliquée lors du serrage de l'écrou soit une force axiale.

Les jauges de contraintes sont constituées par un circuit imprimé métallique en constantan monté sur un support isolant en polyimide. Les variations de la résistance électrique du circuit imprimé en fonction de la contrainte appliquée se mesurent sur un pont de Wheatstone, l'une des branches de ce pont étant constituée par la jauge.

Nous pouvons ainsi établir 4 courbes d'étalonnages correspondant aux 4 jauges de contraintes en mesurant la variation de tension (variation de résistance électrique) du circuit imprimé en fonction de la force axiale.(→ graphe 3./2 )

## **3.2. Contraintes thermiques sur les tirants de suspension par la mise en froid**

### **3.2.1. Analyse des contraintes thermiques induites**

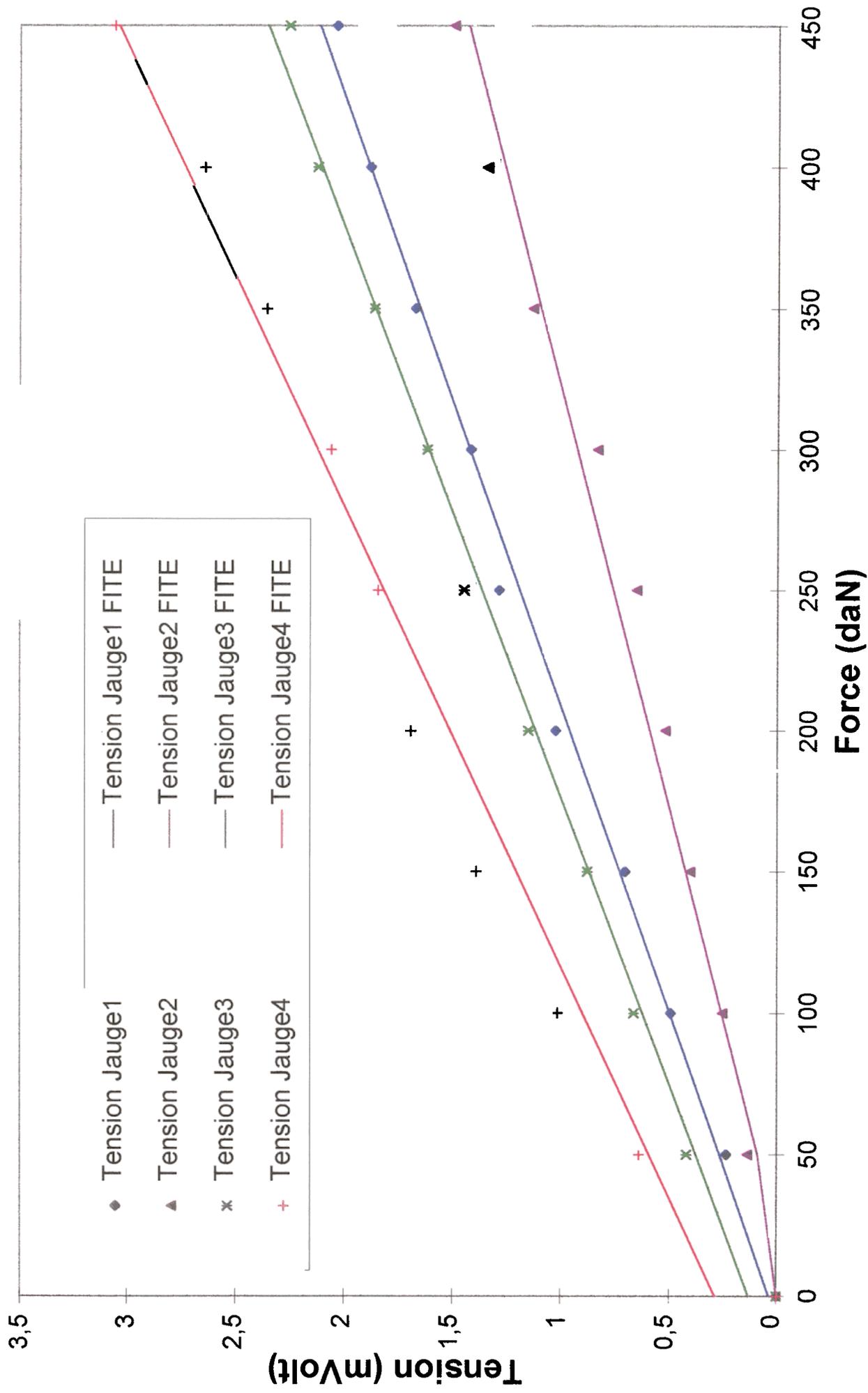
Une analyse mécanique approfondie est complexe, elle exigerait la connaissance des caractéristiques thermo-élastique de toutes les parties impliquées (tirants, points d'ancrage à l'ambiante et à froid).

Nous pouvons toutefois procéder à une évaluation approximative en supposant :

- la structure de l'enceinte à vide (→ ancrage à 300 K) et celle du réservoir LHe (→ ancrage 4K) sont considérées comme infiniment rigides. De ce fait, toute la déformation élastique due aux contraintes thermiques est supportée par les seuls tirants (→hypothèse pessimiste !)
- les points d'ancrages sur le réservoir LHe subissent une contraction thermique non élastique d'une masse en acier-inox.
- l'axe horizontal du réservoir ainsi que le point milieu sur cet axe restent immuables lors de la mise en froid (→ symétrie supposée du processus )
- la conduction de chaleur dans le tirant est adiabatique entre 300 et 4 K, sans point de thermalisation à mi-chemin du tirant.

Graphe 3./2

# Etalonnage des Jauges de contraintes



Une contrainte thermique est induite dans un tirant de suspension par une variation imposée  $\Delta L_{th}$ , de sa longueur initiale  $L_0$  à l'ambiante et qui se compose : ( $\rightarrow$  fig 3./2)

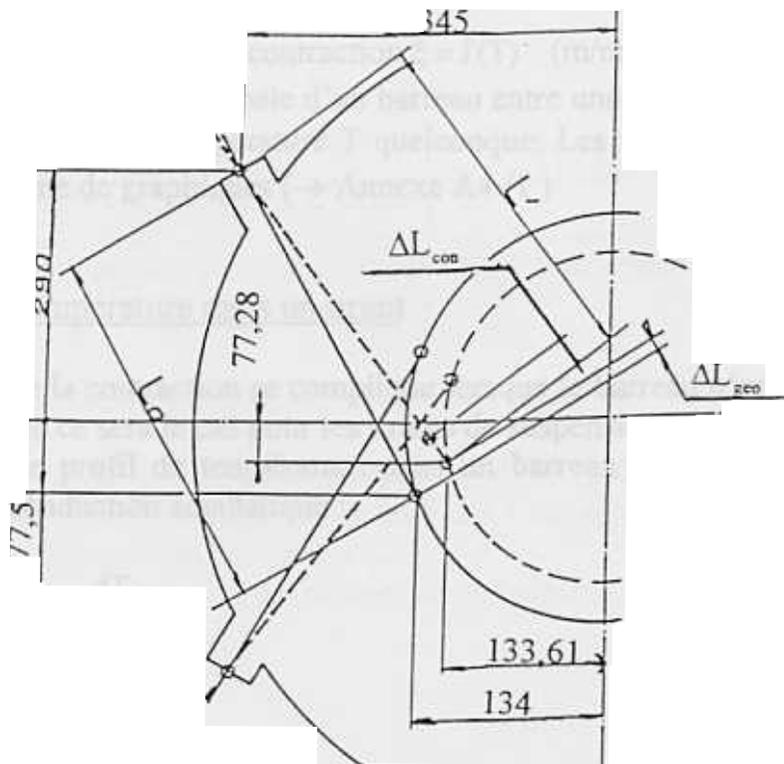
- d'un déplacement virtuel résultant d'une contraction thermique du tirant supposée libre sous le seul effet de son refroidissement de l'ambiante à la température

$\rightarrow \Delta L_{con}$

- d'un déplacement effectif du point d'ancrage à froid du tirant dû à la contraction thermique du réservoir lui-même modifiant de ce fait la géométrie initiale de la suspension

(  $L_0 \rightarrow L'$  ) et par conséquent :

$\rightarrow \Delta L_{geo} = L' - L_0$



$L_0 = 421,16658 \text{ mm} \quad L' = 421,17176 \text{ mm} \quad \Delta L_{geo} = 5,23 \times 10^{-3} \text{ mm}$

**Fig 3./2** Principe de la suspension radiale sur CRYOCAP

La contrainte thermique  $\sigma_{th}$  induite dans le tirant est fonction de la somme ( $\Delta L_{con} + \Delta L_{geo}$ ), puisque le tirant, dans les faits, compense sa contraction thermique par un allongement élastique et subit en outre le déplacement de son point d'ancrage à 4K (dans notre configuration ce déplacement contribue à une réduction de la contrainte !).

$$\sigma_{th} = \delta_{th} \cdot E$$

où

$$\delta_{th} = \frac{\Delta L_{geo} + \Delta L_{con}}{L_0}$$

avec :

$\sigma_{th}$	Contraction thermique induite	(daN/mm <sup>2</sup> )
$\delta_{th}$	Allongement du tirant froid	(m/m)
$E$	Module d'élasticité du tirant	(daN/mm <sup>2</sup> )
$\Delta L_{con}$	Contraction libre non entravée du tirant	(mm)
$\Delta l$	Variation de la longueur géométrique du tirant	(mm)
$L_0$	Longueur initiale du tirant	(mm)

### 3.2.2. Contraction thermique d'un matériau

La contraction thermique d'un matériau peut se caractériser de deux manières distinctes :

- un coefficient linéaire de la contraction  $\xi = f(T)$  (m/m K)
- une contraction relative globale d'un barreau entre une température de référence  $T_0$  (273 K ou 300 K) et une température  $T$  quelconque. Les valeurs  $(L - L_0) / L_0$  sont alors données sous forme de graphiques (→ Annexe A4./1)

### 3.2.3. Profil de température dans un tirant

Le calcul de la contraction se complique lorsque le barreau n'est pas de température homogène comme ce sera le cas pour les tirants de suspension. Pour connaître le profil de température dans un barreau de section constante  $A$  nous supposons une conduction adiabatique :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \text{const} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

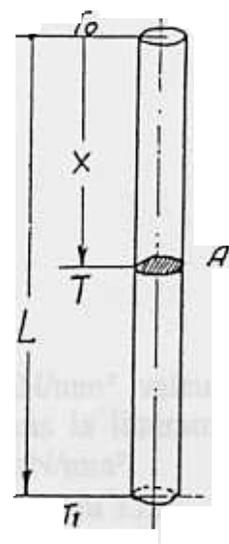
$$\dot{q} dx = -\lambda(T) dT$$

$$\dot{q} x + \text{const} = \int_{T_0}^T \lambda(T) dT$$

pour  $x=0$   $T = T_0 \rightarrow \int_{T_0}^{T_0} \lambda(T) dT \rightarrow \text{const} = 0$

pour  $x=L$   $T = T_1 \rightarrow \int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT$

$$\frac{x}{L} = \frac{\int_{T_0}^T \lambda(T) dT}{\int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT}$$



Avec les intégrales de la conductivité nous pouvons établir le profil de température dans un barreau à section constante pour un matériau donné (→ Annexe A3./1)

### 3.2.4. Contraction globale d'un barreau avec un gradient de température $\Delta L_{con}$

Le profil de température  $T=f(x/L)$  d'un barreau étant connu, nous divisons sa longueur en 30 sections égales et attribuons à chacune sa température moyenne. La contraction globale du barreau avec un gradient se détermine alors comme la somme des contractions de ses 30 sections.

Pour les calculs numériques avec les tirants en époxy-verre nous utiliserons

- faute de mieux, les valeurs  $\int \lambda(T) dT$  du verre

	300 K	80 K	4K
Verre	10	4,4	1
Epoxy-verre	3,5	1,6	0,6

- les valeurs numériques de la contraction thermique de l'époxy-verre de l'annexe A3./2

Il en résulte

	300 K → 4 K
Contraction globale sous gradient	$1,18 \times 10^{-3}$

Pour mémoire : Contraction globale 300 K → 4 K, T homogène  $2,62 \times 10^{-3}$  m/m

### 3.2.5. Variation de la longueur géométrique $\Delta L_{geo}$

Le déplacement du point d'ancrage à 4 K s'évalue par une considération géométrique sur la base des hypothèses du § 3.2.1 en admettant une contraction globale uniforme de 0,0029 mm/mm de 300 à 4 K.

Ce déplacement conduit à une géométrie de suspension légèrement différente d'où on déduit  $\Delta L_{geo}$  (→ Fig 3./2)

### 3.2.6. Contractions thermiques

Connaissant, pour un tirant donné :

- sa contraction thermique  $\Delta L_{con}$  avec un gradient de température
- la variation de sa longueur géométrique  $\Delta L_{geo}$
- son module d'élasticité pour l'époxy-verre  $E = 4000$  daN/mm<sup>2</sup> valeur plutôt pessimiste pour le calcul des contraintes, les chiffres donnés dans la littérature pour différents époxy-verres de 300 à 4 K se situent entre 2000...4000 daN/mm<sup>2</sup>.

Nous pouvons maintenant calculer les contraintes thermiques (→ Tableau 3./2)

Tableau 3./2. Contraintes thermiques induites dans les tirants de suspension.

Désignation	$L_0$ (mm)	Gradient (K)	$\Delta L_{con}$ (mm)	$\Delta L_{geo}$ (mm)	$\Delta L_{th}$ (mm)	$\sigma_{th}$ (daN/mm <sup>2</sup> )	Force (daN)
Tirants Epoxy-verre	421	300/4	0,497	$-5,23 \times 10^{-3}$	0,492	4,67	160

### Conclusion

Les contraintes thermiques calculées sont modestes et ne posent aucun problèmes de résistance mécanique, d'autant que les hypothèses d'évaluations ( $\rightarrow$ §3.2.1) sont plutôt pessimistes.

### 3.3. Conclusion : Traction des tirants à 300 K

Le certificat de conformité établi par le fournisseur ( $\rightarrow$ Annexe A3./3) stipule que les tirants possèdent un seuil de rupture de 2300 daN. Par mesure de sécurité, ces tirants sont utilisés avec une traction équivalent au quart de ce seuil soit  $\sim 575$  daN.

La contrainte thermique induite lors de la mise à froid à 4 K étant  $\sim 160$  daN, ces tirants seront installés sur Cryocap à 300 K avec une traction de 400 daN; les jauges de contraintes permettant d'obtenir cette traction précisément.

## 4. ASPECTS THERMIQUES

Après un bref rappel sur la nature des flux thermiques §4.1., nous calculerons au §4.2. la consommation de réfrigérant nécessaire lors du fonctionnement en état stationnaire de Cryocap et au §4.3. la quantité d'LN et d'LHe consommée par la mise en froid de Cryocap. Dans le § 4.4. nous déterminerons la durée nécessaire à la remise à température ambiante de Cryocap.

### 4.1. Nature des flux thermiques

Il existe dans la nature trois modes de transmission de la chaleur : Rayonnement, conduction et convection. Le gaz présent dans Cryocap est à une pression suffisamment faible ( $\ll 10^{-5}$  mbar) pour que ce dernier mode soit négligé.

#### 4.1.1. Conduction

##### *4.1.1.1. Conduction simple*

Un transfert thermique par conduction se produit dans tous les supports ou liaisons qui conduisent d'un sous ensemble à un autre. Compte tenu de la forte variation de la conductivité  $\lambda = f(T)$  le flux  $Q$  se calcule généralement selon la relation

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT = Z \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$$

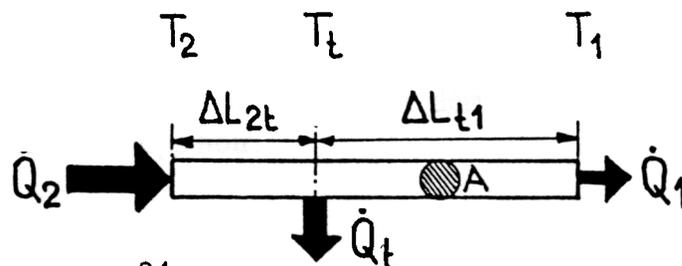
avec  $Q$  Flux de chaleur (W)  
 $A$  Section du conducteur (cm<sup>2</sup>)  
 $L$  longueur du conducteur (cm)  
 $\lambda$  Conductivité thermique du matériau (W/cm K)

##### *4.1.1.2 Conduction avec thermalisation*

La thermalisation consiste à imposer une température donnée  $T_t$  (Fig 4./1) à un point judicieusement choisi du barreau avec l'objectif de réduire le flux conductif vers la plus basse température. Cette modification du gradient naturel s'obtient par l'effet d'un drain thermique à la température de thermalisation:

Fig 4./1 :

Principe de la thermalisation :



On a alors

- flux résiduel en sortie de support  $Q_1 = \frac{A}{\Delta L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT = Z_{11} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$
- flux entrant dans support  $Q_2 = \frac{A}{\Delta L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT = Z_{12} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$
- flux de drain à évacuer à  $T_1$   $Q_t = Q_2 - Q_1$

Le choix du point de thermalisation  $x$  est déterminant pour les trois flux et doit s'effectuer par référence au gradient naturel du support non thermalisé comme l'illustre Fig 4./2 : une réduction du flux  $Q_1$  ne se réalise que pour  $x > x_T$ , sinon le phénomène s'inverse : le flux  $Q_1$  dépasse alors celui d'un support non thermalisé, avec un flux de drain  $Q_t$  négatif.

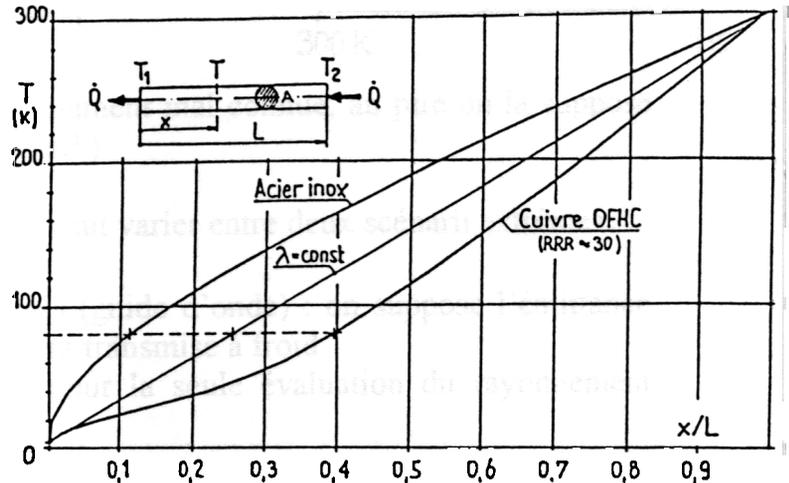


Fig 4./2 Le choix du point de thermalisation et son incidence sur les flux conductifs

## 4.1.2. Rayonnement

### 4.1.2.1 Cas général

Le flux radiatif de chaleur échangée entre deux surfaces aux températures respectives  $T_1$  et  $T_2$  se calcule selon la loi de Stephan :

$$\dot{Q} = F_{12} \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{avec constante } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Le facteur de forme  $F_{12}$  dépend, en règle générale, et de la géométrie des surfaces en regard et de leur émissivité  $\epsilon$ . Pour le cas de surfaces parallèles ou concentriques très proches  $F_{12}$  se réduit à l'expression :

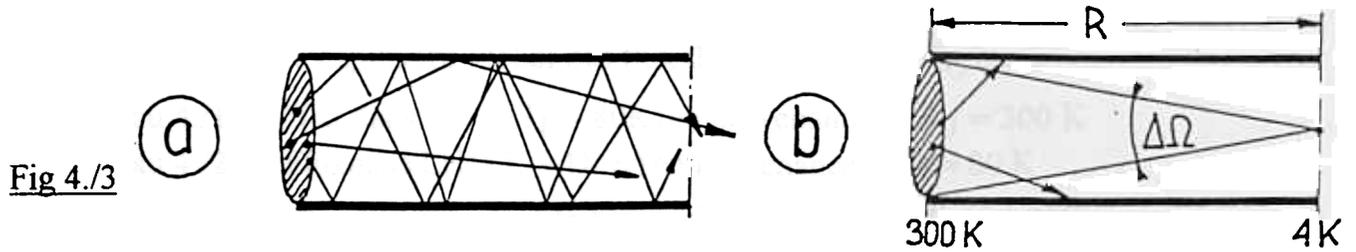
$$F_{12} = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \cdot \epsilon_2}$$

et nous utiliserons cette simplification dans nos calculs.

Le choix d'une émissivité  $\epsilon$  représentative d'un état de surface constitue une différence majeure pour notre évaluation. Si les émissivités de surfaces métalliques homogènes sont bien connues, l'expérience pratique d'une surface "technique" du même matériau, comportant des recoins, trous et petits accessoires montre une dérive rapide et prononcée de son émissivité effective vers celle du corps noir.

#### 4.1.2.2. Rayonnement à travers ouvertures

Le flux radiatif transmis à travers un conduit (Fig 4./3) est fonction de l'émittance de la section chaude et du mode de transmission à travers le conduit.



L'émittance de la section chaude est généralement mal connue, au pire on la suppose égale à celle du corps noir à 300 K ( $q=457 \text{ W/m}^2$ )

La transmission du flux à travers le conduit peut varier entre deux scénarii extrêmes

- réflexion spéculaire parfaite sur les parois (guide d'onde) : on suppose l'émittance hémisphérique de la section chaude intégralement transmise à froid  
Nous retenons cette hypothèse maximaliste pour la seule évaluation du rayonnement 300K → 80 K pour les tubes faisceau.

- absorption complète du rayonnement diffus sur les parois du conduit : le rayonnement  $\Phi(300K)$  qui parvient à froid ( $\rightarrow \Phi(4K)$ ) ne correspond qu'à la fraction de l'émittance hémisphérique de la section chaude  $\Phi(300K)$  au prorata de l'angle solide de la section froide  $S(4K)$  :

$$\Phi(4K) = \Phi(300K) \cdot \frac{S(4K)}{2\pi R^2}$$

avec  $S(4K)$  Section froide à 4K  
R Distance entre sections chaudes et froides

Cette hypothèse est adoptée pour l'évaluation du flux radiatif transmis de 300 K → 4K

## 4.2. Estimation prévisionnelle des flux thermiques

### 4.2.1 Récapitulatif global des flux thermiques

La mise en service de Cryocap à l'IPN (Régime IPN) se fait avec la cavité supraconductrice non alimentée en H.F : c'est le mode de fonctionnement " veille ". Les flux thermiques induits sont alors des FLUX STATIQUES.

Nous avons déterminé dans le § 4.2.2 et §4.2.3 les flux thermiques en régime IPN ce qui nous a permis de définir la consommation de réfrigérant (LN et LHe) nécessaire lors du fonctionnement en état stationnaire de Cryocap.

#### 4.2.1.1 Tableaux récapitulatifs

Les éléments de calculs de l'évaluation des flux et résultats sont donnés dans une série de tableaux 4./0 à 4./4 :

- Tableau 4./0 Récapitulatif global des flux thermiques pour Cryocap
- Tableau 4./1 Flux dans LN<sub>2</sub> (T<sub>1</sub> = 80K) en provenance de T<sub>0</sub> = 300 K
- Tableau 4./2 Flux dans LHe (T<sub>1</sub> = 1.8 K) en provenance de T<sub>1</sub> = 80 K
- Tableau 4./3 Flux thermique par la filasse électrique thermalisée à 80K ("Mesure"+"Puissance") de 300 K → 80 K (Ecran)
- Tableau 4./4 : Flux thermique par la filasse électrique thermalisée à 80K ("Mesure"+"Puissance") de 80 K → 4.5 K / 1.8K

§4.2.3 et §4.2.4 sont un complément qui définissent et précisent les divers flux thermiques des tableaux 4./0 à 4./4. Les flux thermiques y sont indexés ainsi :

- Index 1 Flux thermiques absorbés par l'écran 80 K
- Index 2 Flux thermiques absorbés par le réservoir LHe à 4K
- Index 12 Flux global d'un sous-ensemble (ex : supports Ecran 80 K)
- Index 12<sub>1</sub> Flux partiel d'un sous ensemble (ex : pieds support Ecran 80K)

#### 4.2.1.2. Consommation de réfrigérants (Etat Stationnaire)

Dans une perspective d'exploitation définitive avec réfrigérateur associé, l'évaluation des flux thermiques exprimée en watts est suffisante. Pour les essais cryostatiques à l'IPN qui se feront par transfert de cryofluide (LN ou LHe), une traduction de ces flux en consommation de cryofluide (LN ou LHe) est plus parlante.

Tableau 4./0 donne toutes ces valeurs nominales (→ sans marge de sécurité!)

Tableau 4./0 : Consommations de réfrigérant en régime stationnaire

REGIME IPN	300 K → 80K (LN)	300K ou 80 K → 4K (LHe)
FLUX (W)	54,31	2,42
DEBITS REFRIGERANTS (G/S) (1)	0,27	0,11
CONSOMMATION DE CRYOFLUIDES (L/H) (2)	1,22	3,32

Légende (1)  $\dot{M} = \dot{Q} / l_v$ , avec  $l_v$  : 200 J/g pour LN ; 21 J/g pour LHe (4,2 K)

(2)  $\dot{V}_{liq} = \dot{M} / \rho_{liq}$

Tableau 4./1

**BILAN THERMIQUE DE CRYOCAP, REGIME I.P.N**  
**FLUX DANS LN<sub>2</sub> (T<sub>1</sub> = 80 K) EN PROVENANCE DE T<sub>0</sub> = 300 K**

FLUX	LOCALISATION	Nombres d'éléments identiques	Section A <sub>tot</sub> cm <sup>2</sup>	Longueur L cm	Z <sub>tot</sub> cm	Surface S cm <sup>2</sup>	MATERIAU	$\int_{80K}^{300K} \lambda dT$ W/cm	q <sub>R</sub> W/cm <sup>2</sup>	Q <sub>m,n</sub> W
111	Enceinte à vide -> Ecran LN					4,70E+04	Superisolation (40 couches) ε <sub>1</sub> = 1 ; ε <sub>2</sub> = 1	0,753	6,00E-04	28,2
112	Enceinte -> anneaux baffles				2,00E+02					
121	Pied support	4	10	5	2		plaque nylon			6,02
131	Thermalisation tube faisceau	2	0,607	19	3,19E-02		Callorstat 316L	27,1		1,73
132	Rayonnement tube faisceau	2				9,62	Rayon. 2 disques noirs		0,045	0,87
14	Thermalisation coupleur principal	1					Biblio [3]			2,2
15	Filasse électrique (Mesure + Puiss)						Tableau 4.3			6,29

**FLUX THERMIQUE TOTAL EN REGIME I.P.N** **54,31W**

28

Tableau 4./2

**BILAN THERMIQUE DE CRYOCAP, REGIME I.P.N**  
**FLUX DANS LHE (T<sub>2</sub> = 1.8 K) EN PROVENANCE DE T<sub>1</sub> = 80 K ou 300 K**

FLUX	LOCALISATION	Nombres d'éléments identiques	Section A <sub>tot</sub> cm <sup>2</sup>	Longueur L cm	Z <sub>tot</sub> cm	Surface S cm <sup>2</sup>	MATERIAU	T <sub>α</sub>	$\int_{1,8K}^{T_{\alpha}} \lambda dT$	q <sub>R</sub> W/cm <sup>2</sup>	Q <sub>m,n</sub> W
21	Ecran 80K -> Réservoir LHe					1,90E+04	Superisolation (40 couches)	80		2,50E-05	0,48
22	Tirants radiaux	2 × 4	0,342	31,9	1,07E-02		Epoxy-verre	300	1,99		0,17
23	Tube faisceau	2	0,607	19	3,19E-02		Callorstat 316L	80	3,49		0,23
24	Rayonnement tube faisceau	2				9,62	ε <sub>1</sub> = 1 ; ε <sub>2</sub> = 1	300		0,045	0,083
25	Centreur point fixe	1	1,63	35,2	0,046		Epoxy-verre	300	1,99		0,09
26	Rayonnement par 4 tubes de visés	4				12,57	Corps noir	300		0,045	0,03
27	Coupleur principal						Biblio [3]	80			0,35
28	Filasse électrique (Mesure + Puiss)						Tableau 4.4				0,99

**FLUX THERMIQUE TOTAL EN REGIME I.P.N** **2,42 W**

Tableau 4./4: FLUX THERMIQUE PAR FILASSE THERMALISEE A 80 K ("MESURE" + "PUISSANCE")  
80 K -> 4,5 K / 1,8K

FONCTION	Réf.	DETAIL		FLUX THERMIQUE				$\sum q_i$ W
		Qté.	Matériau	Section A cm <sup>2</sup>	Long.L cm	Z=A/L cm	$\int \lambda dT$ W/cm	
Filasse Mesure 300 K->1,8 K	He 2	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02
	Ti 101	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02
	Ti 102	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02
	Ti 103	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02
	Ti 104	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,68E-02
	Ti 104'	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02
	T mot	1	Cuivre	8,48E-03	190	4,48E-05	608	2,70E-02
	He 1	1	Cuivre	8,48E-03	190	4,48E-05	608	2,70E-02
	LT 105	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02
	LE 105'	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02
	Li 106	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02
	Li 107	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02
	H 109	2	Cuivre	6,28E-03	185	3,38E-05	611	4,14E-02
	H 109	2	Cuivre	6,28E-03	275	2,28E-05	611	2,78E-02
	HOM 1.1	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,68E-02
	HOM 1.2	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02
	HOM 2.1	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,68E-02
HOM 2.2	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02	
Câbles HOM	HOM 1 / 2 / Pick up	3	Cuivre Alu	0,022 0,01	150 150	1,47E-04 6,67E-05	611 232	8,98E-02 1,55E-02
	Alim. Accel	2	Cuivre	8,48E-03	180	4,71E-05	611	2,88E-02
Alim. moteurs	4	Cuivre	6,28E-03	180	3,49E-05	611	2,13E-02	
Alim. sonde magn	1	Cuivre	6,28E-03	220	2,86E-05	611	1,75E-02	
<b>FLUX THERMIQUE TOTAL</b>								<b>0,517</b>
<b>FLUX THERMIQUE TOTAL</b>								<b>0,994 W</b>

Tableau 4./4: FLUX THERMIQUE PAR FILASSE THERMALISEE A 80 K (" MESURE" + " PUISSANCE")  
80 K -> 4,5 K / 1,8K

FONCTION	DETAIL				FLUX THERMIQUE 300 K -> 80 K				
	Réf.	Qté.	Matériau	Section A cm <sup>2</sup>	Long.L cm	Z=A/L cm	$\int \lambda dT$ W/cm	$q_i$ W	$\Sigma q_i$ W
Filasse Mesure 300 K->1,8 K	He 2	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02	0,517
	Ti 101	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02	
	Ti 102	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02	
	Ti 103	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02	
	Ti 104	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,66E-02	
	Ti 104'	1	Cuivre	8,48E-03	200	4,24E-05	611	2,59E-02	
	T mot	1	Cuivre	8,48E-03	190	4,46E-05	606	2,70E-02	
	He 1	1	Cuivre	8,48E-03	190	4,46E-05	606	2,70E-02	
	LT 105	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02	
	LE 105'	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02	
	LI 106	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02	
	LI 107	1	Cuivre	8,48E-03	150	5,65E-05	611	3,45E-02	
	H 109	2	Cuivre	6,28E-03	185	3,39E-05	611	4,14E-02	
	H 109	2	Cuivre	6,28E-03	275	2,28E-05	611	2,78E-02	
	HOM 1.1	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,66E-02	
	HOM 1.2	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02	
	HOM 2.1	1	Cuivre	8,48E-03	195	4,35E-05	611	2,66E-02	
	HOM 2.2	1	Cuivre	8,48E-03	215	3,94E-05	611	2,41E-02	
Câbles HOM	HOM 1 / 2 / Pick up	3	Cuivre	0,022	150	1,47E-04	611	8,98E-02	0,316
			Alu	0,01	150	6,67E-05	232	1,55E-02	
Alim. Accel	Accel1V / 2V	2	Cuivre	8,48E-03	180	4,71E-05	611	2,88E-02	0,058
Alim. moteurs	mot	4	Cuivre	6,28E-03	180	3,49E-05	611	2,13E-02	0,0852
Alim. sonde magn	SM 1	1	Cuivre	6,28E-03	220	2,86E-05	611	1,75E-02	1,75E-02
<b>FLUX THERMIQUE TOTAL</b>									<b>0,994 W</b>

## 4.2.2. Evaluation individuelle des flux de 300 K → 80 K

Ce chapitre donne un complément d'information concernant l'évaluation des flux thermiques supportés par l'écran 80 K. (→ Tableau 4./1)

**Q<sub>111</sub>** Flux radiatif entre enceinte à vide et écran superisolé; calcul simplifié

- superficie moyenne de l'écran →  $S = 4,7 \text{ m}^2$
- densité de flux 300 K → 80 K à travers une superisolation →  $q \approx 6 \text{ W/m}^2$

**Q<sub>112</sub>** Flux radiatif entre l'enceinte à vide et les baffles noires

- 2 ouvertures  $\phi_{\text{int}} 100 \text{ mm}$
- 4 ouvertures  $\phi_{\text{int}} 40 \text{ mm}$  →  $S = 0,02 \text{ m}^2$

Calcul simplifié pour deux surfaces parallèles avec les émissivités

- $\epsilon_1 = 1$  pour l'enceinte 300K
- $\epsilon_2 =$  pour l'anneau exposé du baffle →  $q = 0,045 \text{ W/m}^2$

**Q<sub>121</sub>** Conduction à travers les 4 pieds supports de l'écran

Configuration géométrique selon plan SBT 63.10.203 ( → Annexe A4./1) assimilé pour le calcul à deux plaques en époxy-verre

- Largeur 12 mm, épaisseur 40 mm  
Section totale  $S = 12 \times 40 \times 2 = 960 \text{ mm}^2$  →  $S \approx 10 \text{ cm}^2$
- Longueur de conduction thermique →  $L \approx 5 \text{ cm}$

**Q<sub>131</sub>** Conduction le long des 2 tubes faisceau (thermalisation)

Configuration géométrique selon plan I251SC300-C (→ Annexe A4./2) ramené pour le calcul à la simple conduction à travers le soufflet CALLORSTAT 316L:

- $\phi_{\text{int}} 65, \phi_{\text{ext}} 90 \rightarrow \phi_{\text{moy}} = 77,5 \text{ mm}$ ; épaisseur 0,2 mm →  $A = 0,607 \text{ cm}^2$
- Longueur géométrique du soufflet : 40 mm  
Longueur de conduction thermique  $L \approx 40 + 12 \cdot 12,5 \text{ mm} = 190 \text{ mm}$

**Q<sub>132</sub>** Rayonnement 300 K → 80 K à travers les 2 tubes faisceaux ( → Annexe A4./3)

Considérons le flux radiatif d'un disque noir  $\phi = 35 \text{ mm}$  placé à l'extrémité chaude du soufflet et supposons que la totalité du flux soit absorbé par les surfaces à 80K excepté le flux qui passe par le diaphragme  $\phi = 35 \text{ mm}$  et qui sera absorbé à 4 K

- $Q_R = S \cdot q_R(300 \text{ K}, \epsilon = 1) = 2,9,62,45 \text{ mW/cm}^2 = 0,87 \text{ W}$

**Q<sub>14</sub>** Thermalisation du coupleur principal

Puissance thermique à évacuer à 80 K par le coupleur principal → 2,2W

### Q<sub>15</sub> Thermalisation de la filasse électrique (mesure + puissance)

Le flux conductif de la filasse vers l'écran 80 K est modeste. Nous prenons en considération le flux direct ( 300 K → 80 K ) par la filasse électrique ainsi qu'un flux de drain résultant d'une thermalisation des filasses 300 K → 4 K. ( → Tableau 4./3)  
Il y a dans Cryocap trois types de filasse répertoriés Annexe A4./5.

### 4.2.3. Evaluation thermique des flux 300 ou 80 K → 4 K

Ce chapitre précise l'évaluation des flux thermiques absorbés par le réservoir LHe à ,8 K ( → 4 K pour la simplification du calcul) (→ Tableau 4./2)

### Q<sub>21</sub> Flux radiatif entre écran 80 K et réservoir LHe

- Superficie moyenne du réservoir LHe → S = 1,9 m<sup>2</sup>
- Densité de flux 80 K → 4 K à travers une superisolation → q ≈ 0,25 W/m<sup>2</sup>

### Q<sub>22</sub> La conduction dans les tirants d'époxy-verre se calcul, faute de mieux, avec la valeur $\int \lambda dT$ du verre, hypothèse plutôt pessimiste.

A noter qu'aucun des tirants n'est thermalisé à 80 K.

- Diamètre des tirants →  $\phi = 6,6$  mm
- Longueur thermique des tirants → L = 319 mm

### Q<sub>23</sub> Conduction le long des 2 tubes faisceaux (thermalisation)

Configuration géométrique selon plan I251SC300-C (→ Annexe A4./2), ramené pour le calcul à la simple conduction à travers le soufflet CALLORSTAT 316L:

- $\phi_{int} 65, \phi_{ext} 90 \rightarrow \phi_{moy} = 77,5$  mm; épaisseur 0,2 mm → A = 0,607 cm<sup>2</sup>
- Longueur géométrique du soufflet : 40 mm  
Longueur de conduction thermique L ≈ 40 + 12.12,5 = 190 mm

### Q<sub>24</sub> Rayonnement " noir " $\Phi(300K)$ à travers le diaphragme $\phi = 35$ mm placé dans chaque tube faisceau à 80K. (pour 2 tubes faisceaux dans Cryocap) (→ Annexe A4./3)

- $\Phi(300 K) = S(300 K).q = 2.9,62.0,045 = 0,866$  W
- Fraction du flux hémisphérique passant par S(4 K) distant de R = 4 cm

$$\Phi(4 K) = \Phi(300 K) \cdot \frac{S(4 K)}{2\pi R^2} = 0,866 \cdot \frac{9,62}{100,53} = 0,083 \text{ W}$$

### Q<sub>25</sub> Conduction à travers le centreur point fixe de l'écran

Configuration géométrique selon plan SBT 63.10.203 assimilé pour le calcul thermique à un simple tube epoxy-verre (→ Annexe A4./4) :

- $\phi_{ext} = 28$  mm, épaisseur 2 mm → S = 1,63 cm<sup>2</sup>
- Longueur de conduction thermique → L = 35,2 cm

**Q<sub>26</sub>** Rayonnement “ noir ”  $\Phi(300\text{K})$  à travers le diaphragme  $\phi$  40 mm des 4 tubes de visés.

- $\Phi(300\text{ K}) = S(300\text{ K}).q = 4.12,57.0,045 = 2,26\text{ W}$
- Fraction du flux hémisphérique passant par S(4 K) distant de R = 120 mm

$$\Phi(4\text{ K}) = \Phi(300\text{ K}).\frac{S(4\text{ K})}{2\pi R^2} = 2,26.\frac{12,57}{904,78} \cong 0,03\text{ W}$$

**Q<sub>27</sub>** Conduction par coupleur principal (Hors H.F)

- Estimation FERMILAB (→biblio [3]): 0,03 W + 0,32 W évacués par thermalisation à 4,5 K

**Q<sub>28</sub>** Conduction par les filasses “ MESURES ” et “ PUISSANCES ”

Pour la présente évaluation nous retiendrons une thermalisation du flux conductif à 80 K présenté au § 4.1.1.2 (→ Tableau 4-4)  
Il y a dans Cryocap trois types de filasse répertoriés Annexe A4./5.

Maintenant que nous avons déterminé la consommation de réfrigérant (LN et LHe) nécessaire lors du fonctionnement en état stationnaire de Cryocap déterminons la quantité d’LN et d’LHe nécessaire à la mise en froid de l’écran 80K et du réservoir LHe.

### 4.3. Mise en froid

La mise en froid d’un équipement cryogénique n’est généralement qu’une opération transitoire qui mérite toutefois une analyse succincte pour plusieurs raisons :

- procédure de la mise en froid
- consommation de réfrigérant ( cryofluide ou puissance de réfrigération)
- vitesse de mise en froid

#### 4.3.1. Procédure de mise en froid

##### *4.3.1.1. Mise en froid par réfrigérant associé*

Le refroidissement idéal d’une masse d’équipement s’effectue par un réfrigérateur associé qui évacue selon un cycle de Carnot à une température de plus en plus basse. Le travail de réfrigération minimum théoriquement nécessaire correspond alors à l’intégrale des cycles de Carnot.

#### 4.3.1.2. Mise en froid par l'emploi d'un cryofluide

L'utilisation d'un cryofluide (LN ou LHe) est la procédure qui sera utilisée dans les essais des cryomodules à l'IPN. L'efficacité thermodynamique n'est pas optimale, puisque la réfrigération ne s'opère uniquement par la différence d'enthalpie transférable entre le réfrigérant et la masse à la température T à un moment donné. Si jamais l'échange de chaleur entre masse à refroidir et réfrigérant sortant est mauvais de surcroît, la consommation de cryofluide s'en ressentira.

#### 4.3.2. Consommation de cryofluide

Pour les essais IPN où nous utiliserons LN ou LHe la consommation de cryofluide s'évalue selon la méthode de Jacobs (→ Biblio [4]) ou à l'aide de valeurs prédéterminées selon annexe A4./6

Constatons que nous avons toujours intérêt d'utiliser au mieux l'enthalpie réfrigérante des vapeurs froides. Pour ce faire, il faut veiller au bon échange thermique entre réfrigérant et masse à refroidir. Tableau 4./5 donne un chiffre maxi/mini établi pour la mise en froid de l'écran 80 K et du réservoir LHe. Nous estimons que nos valeurs expérimentales se tiendront assez proches des consommations minimum calculées.

#### 4.3.3. Vitesse de mise en froid

##### 4.3.3.1. Ecran 80 K

La mise en froid des écrans par circulation d'LN est limitée en partie par les pertes de charges (surtout vers 300K), mais plus particulièrement par la mauvaise qualité d'un échange en régime diphasique de caléfaction. Pour obtenir une surface d'échange suffisante un serpentin à tube lisse a été brasé sur l'écran 80 K.

Les caractéristiques du serpentin sont les suivantes :

- 17 m de tube cuivre  $\phi_{int}$  10 mm
- mise en froid de l'écran (= virole réfrigérée) dans ~ 2,5 heures
- perte de charge moyenne pour débit  $M= 2,9$  g/s :  $\Delta P = 0,66$  mbar

##### 4.3.3.2. Réservoir LHe

Pour les essais IPN on utilisera de LHe transféré directement à partir d'une réserve externe. Une mise en froid économique exige une utilisation des vapeurs froides qui doivent balayer efficacement la masse métallique du réservoir à refroidir. De ce fait une évaluation préalable se limitera à la consommation prévisible d'LHe (Tableau 4./5); une estimation du temps de la mise en froid semble difficile et dépendra de la procédure optimale que l'on aura déterminé empiriquement.

Tableau 4./5 : Mise en froid de CRYOCAP

Désignation	THERMIQUE			REFRIGERANT			MISE EN FROID	
	Matériau	Masse (kg)	Ti→Tf (K)	Nature	Spécifique mini/maxi (ltr/kg)	global mini/maxi litres	Durée prévue (h)	Débit moyen g/s
Ecran 80K	cuivre	85	300→80	LN	0,28 0,46	24 40	2,5 2,5	2,15 3,57
Reservoir LHe (sans cavité)	inox	30	300→4	LHe	0,80 (33,6)*	24 (1008)*	5 10	0,17 3,49

\* Cas extrême, considéré comme peu probable, donc présenté entre parenthèses.

#### 4.4. Réchauffage du cryostat

Si la masse froide contenue dans un cryostat est importante il est généralement conseillé de prévoir un dispositif de réchauffage pour accélérer une remise à température ambiante lorsqu'une intervention dans l'enceinte à vide s'impose pour une raison quelconque. Certes on peut parvenir au même résultat par une simple rupture du vide d'isolation, procédé qui engendre toutefois une condensation de vapeur d'eau importante à l'extérieur du cryostat (risque de corrosion, de ruissellement sur l'électronique adjacente, etc. ), éventuellement même à l'intérieur de l'enceinte (humidité déposée sur parties restées froides, superisolation, etc. ) ce qui pénalisera à la remise sous vide du même appareil.

##### 4.4.1. Réservoir LHe

Dans leur installation définitive le réchauffage du réservoir LHe des cryomodules sera assuré par circulation d'He gaz "chaud" ( ~ 300K) à partir du réfrigérateur. De ce fait aucun chauffage auxiliaire n'est prévu pour les premiers essais à l'IPN, où l'on profitera, si besoin était, du réchauffage électrique de l'écran ( qui entoure le réservoir LHe ), combiné avec la mise sous atmosphère d'azote sec de l'enceinte à vide, pour ramener la masse centrale à température ambiante.

##### 4.4.2. Ecran 80K

Un réchauffage forcé de l'écran 80 K peut s'effectuer à l'aide d'un cordon chauffant, genre Thermocoax, entièrement brasé à l'étain sur la virole de l'écran. Tableau 4./6 donne les paramètres essentiels sur ces dispositifs.

Tableau 4./6 : Réchauffeur Ecran 80K

ENSEMBLE	ELEMENT CHAUFFANT	ELEMENT CHAUFFANT			RECHAUFFAGE ECRAN			
		long. chauff. (m)	$R_1$ ( $\Omega/m$ )	$R_{tot}$ ( $\Omega$ )	$Q_{ch}$ (W)	Masse M M (kg)	Enthalpie $\Delta H = M \cdot \Delta h$ (J)	Temps $\Delta t = \Delta H / Q_{ch}$ (h)
Ecran 80 K	Pyrotenax type 216	30	2,21	66,3	1566	85	$6,26 \times 10^6$	1,11

# CONCLUSION

## Bilan

En Avril 96, au début de mon stage au service R.D.A de T. Junquera, une brève étude thermique de Cryocap avait été réalisée par S. Bühler excluant entre autres la filasse électrique. Quant à l'étude des tirants de suspension, elle s'arrêtait à l'étalonnage des jauges de contraintes.

En Juin 96, je laisse à la disposition de ce service une étude détaillée des flux thermiques à l'intérieur de Cryocap incluant la filasse électrique ainsi que la thermalisation des différents éléments de Cryocap. J'ai également converti ces flux en consommation de réfrigérant en régime stationnaire et lors de la mise à froid. J'ai aussi évalué la durée de réchauffement à la température ambiante de Cryocap.

En ce qui concerne les aspects mécaniques, je présente dans ce rapport une étude détaillée du système de serrage incluant l'étude de 3 types de rondelles ainsi que l'étalonnage des jauges de contraintes. J'ai aussi réalisé une étude sur la contraction thermique des tirants lors de la mise à froid.

J'ai également participé avec M. Le Goff à l'alignement horizontal et vertical de Cryocap avant la réception de la cavité de capture.

## Perspectives

La cavité de capture est arrivée à l'IPN d'Orsay le 18/06/96. M. Junquera m'ayant repris dans son service pour le mois de Juillet, je pourrai participer au montage de la cavité de capture dans le Cryostat ainsi qu'aux tests cryogéniques que subira la cavité à l'IPN.

Je pourrai comparer ainsi les calculs présentés dans ce rapport avec les valeurs expérimentales.

ANNEXES

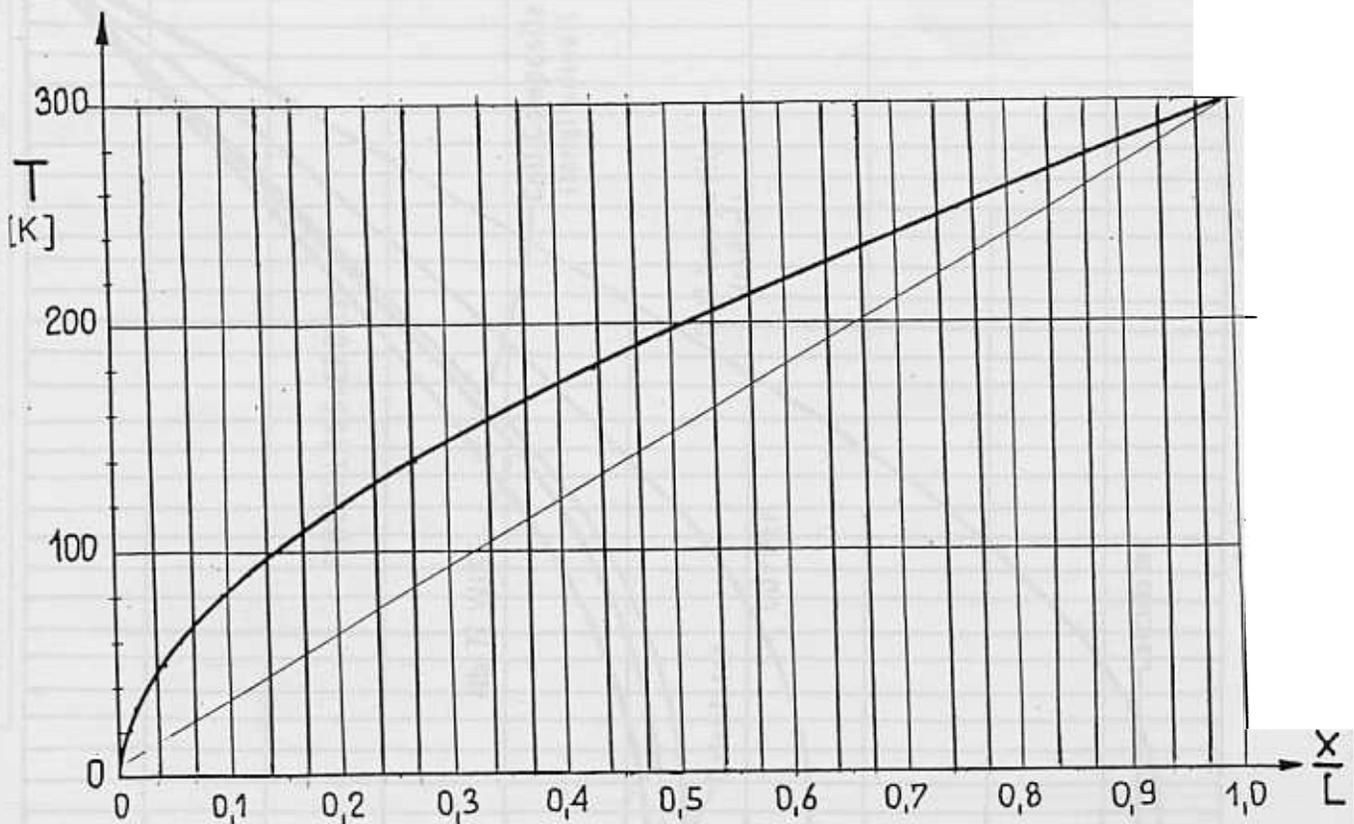
## CALCUL DU GRADIENT "NATUREL" POUR UN BARREAU A SECTION CONSTANT

$T(x)$ K	$\int_{T_0}^{T(x)} \lambda(T) dT$	$\frac{x}{L} = \frac{\int_{T_0}^{T(x)} \lambda(T) dT}{\int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT}$
4	0	0
10	6,81	0,0034
20	27,9	0,014
40	58,6	0,029
60	115	0,058
80	194	0,097
100	292	0,147
120	408	0,205
140	542	0,272
160	694	0,349
180	858	0,431
200	1030	0,517
250	1500	0,754
300	1990	1

$$T_0 = 4 \text{ K}$$

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

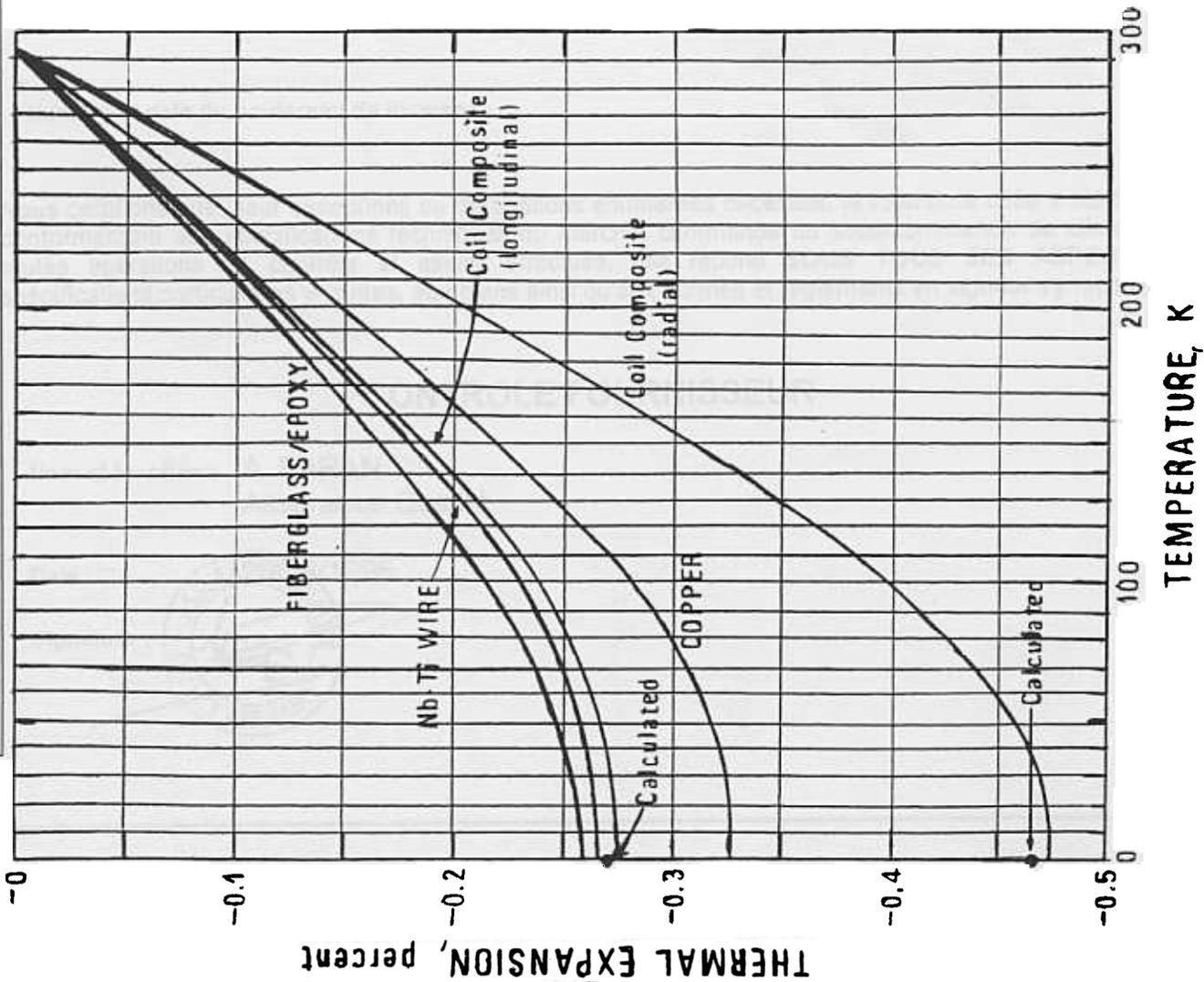
$$\int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT = 1990 \text{ mW / cm}$$



PROFIL DE TEMPERATURE  $T=f(x/L)$  D'UN BARREAU EN VERRE DE SECTION CONSTANTE ENTRE 4 ET 300 K

Contraction thermique d'un tirant avec un gradient naturel 300 K → 4 K par l'addition de la contraction de 30 éléments de longueur L/30 à la température respective Tm (300 K → 4K)

ANNEXE A3.2



Elément N°	Tm K	$\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^{th}$
1	30	-2,55E-03
2	55	-2,45E-03
3	75	-2,34E-03
4	90	-2,23E-03
5	102	-2,14E-03
6	113	-2,03E-03
7	123	-1,95E-03
8	133	-1,84E-03
9	143	-1,75E-03
10	153	-1,64E-03
11	162	-1,56E-03
12	170	-1,45E-03
13	178	-1,36E-03
14	187	-1,25E-03
15	193	-1,19E-03
16	203	-1,08E-03
17	210	-1,00E-03
18	215	-9,22E-04
19	223	-8,44E-04
20	230	-7,50E-04
21	237	-6,87E-04
22	243	-6,25E-04
23	250	-5,31E-04
24	257	-4,22E-04
25	263	-3,59E-04
26	272	-2,50E-04
27	278	-1,56E-04
28	283	-1,09E-04
29	290	-3,12E-05
30	297	6,20E-05
$\Sigma$		-3,54E-02

$$\sum_{i=1}^{30} \frac{\Delta l}{l} = -3,54 \times 10^{-2} \rightarrow \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{moyenne}} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \frac{\Delta l}{l} = -1,18 \times 10^{-3}$$

( d'après R. P. REED · MATERIALS AT LOW TEMPERATURE (NBS 1983) )

Fournisseur : LERC S.A. Usine : St AMAND les EAUX	CERTIFICAT DE CONFORMITE AUX STIPULATIONS D'UNE COMMANDE ETABLI PAR L' INDUSTRIEL FOURNISSEUR CONFORMEMENT A LA NORME NF L 00-015	N° du Certificat : 2649 Nbre de feuilles : 1/1
--	--	---

Raison sociale : INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLEAIRE  
du client, usine : BP 1 91406 ORSAY CEDEX

Numéro de Commande : 943956D  
Numéro de Marché :  
Renseignements particuliers aux fournitures livrées,  
notamment la référence des dérogations accordées :

- Désignation : Tirant verre epoxy  $\varnothing$  6.6 mm lg 449 mm
- Référence: 76255
- Quantité : 9
- Numéro de série ou lot :
- Autres renseignements : Traction unitaire à 1000 daN effectuée  
**Rupture sur une piece à 2300 daN**

Numéro et date du bordereau de livraison :

Nous certifions que, sauf exceptions ou dérogations énumérées ci-dessus, la fourniture citée a été fabriquée conformément aux spécifications techniques du marché, commande ou sous-commande du client et que, toutes opérations de contrôle et essais effectués, elle répond **SOUS TOUS SES ASPECTS**, aux spécifications particulières y-jointes, aux plans ainsi qu'aux normes et règlements en vigueur s'y rapportant.

### CONTROLE FOURNISSEUR

Nom et fonction : A. BARAN  
Assurance Qualité

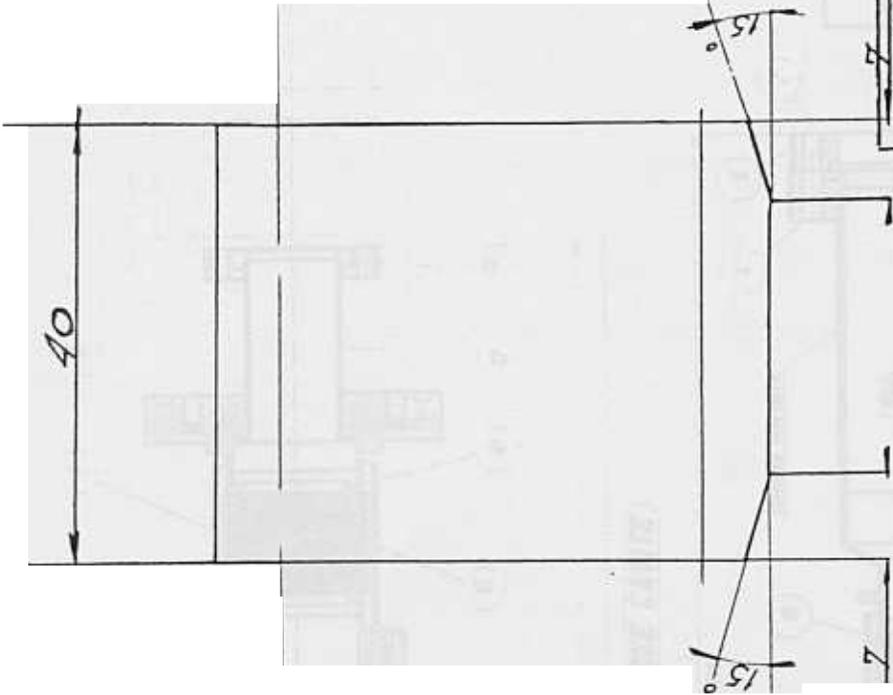
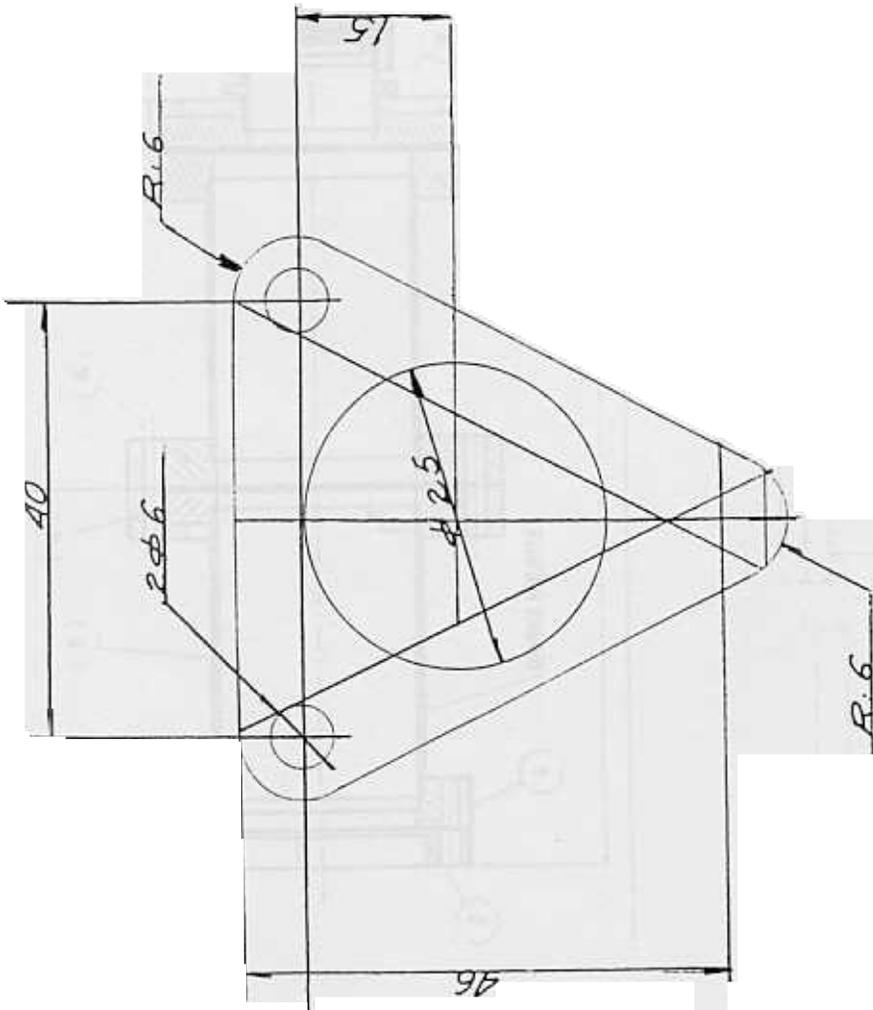
Date :

Signature :



Eventuellement, visa et date  
du Service de Surveillance  
ou du BUREAU VERITAS

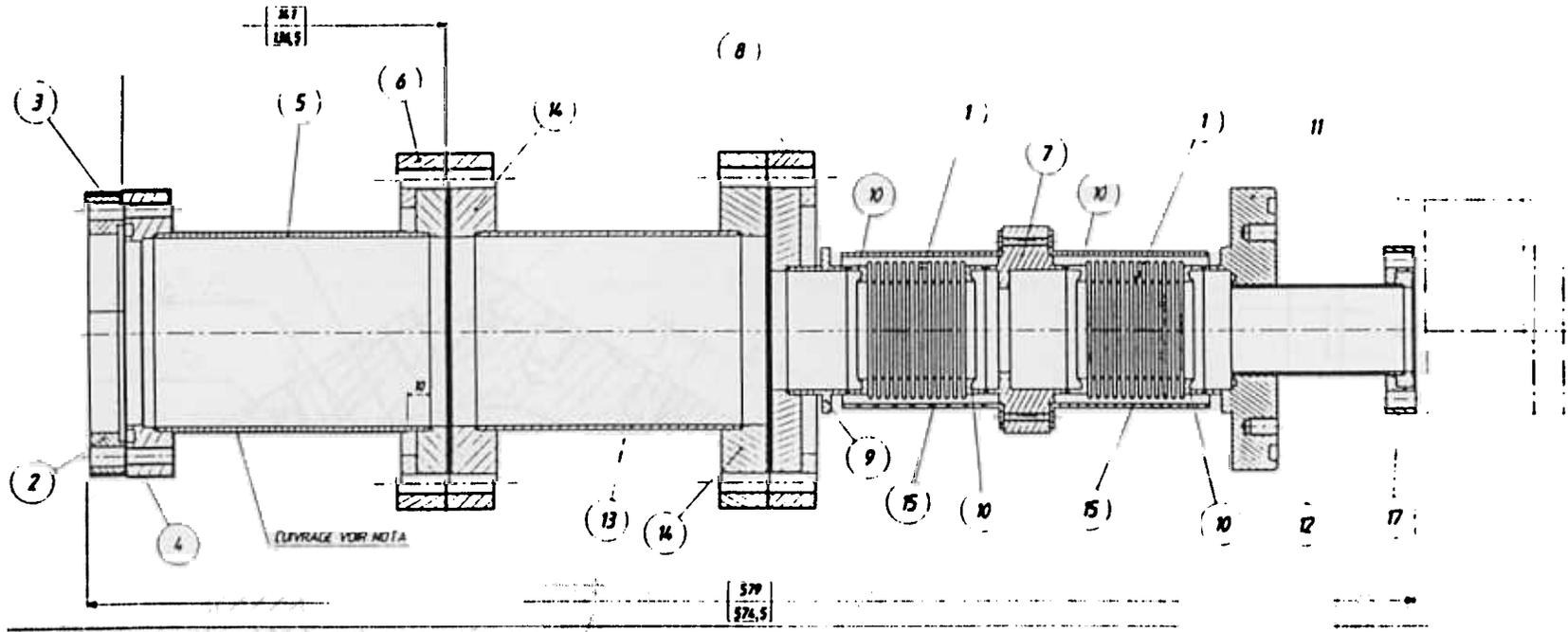
ARCHIVES



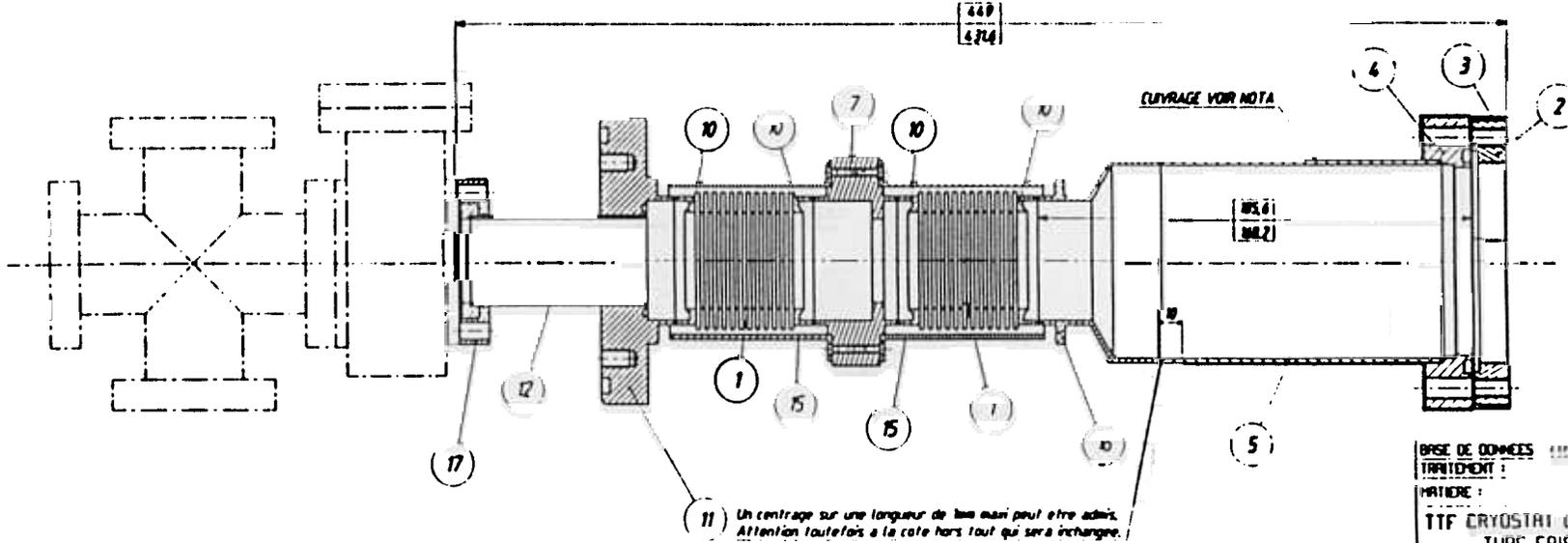
INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE - 91400 ORSAY  
Service des Basses Températures

PIED

Ensemble :	TTF. CRYOCAP	Dessiné :	PA/L	Date :	9/10/195	Echelle :	2
Matière :	NYLON						
Traitements :	/						
Quantité :	A						
Tolérances générales :	H11. h11						
Dessinateur général :	BB. 3.2						
N° 63.10.203							



(8) **(TUBE FAISCEAU ENTREE CAVITE)**



**NOTA**

Les données indiquées sur les fiches techniques de ce document ont été vérifiées par les services de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) et sont considérées comme exactes. Toutefois, l'Institut National de la Recherche Scientifique ne saurait être tenu responsable des conséquences éventuelles de l'utilisation de ces données sans la consultation préalable de l'Institut National de la Recherche Scientifique.

Le service de la documentation de l'Institut National de la Recherche Scientifique est à votre disposition pour toute information relative à ce document.

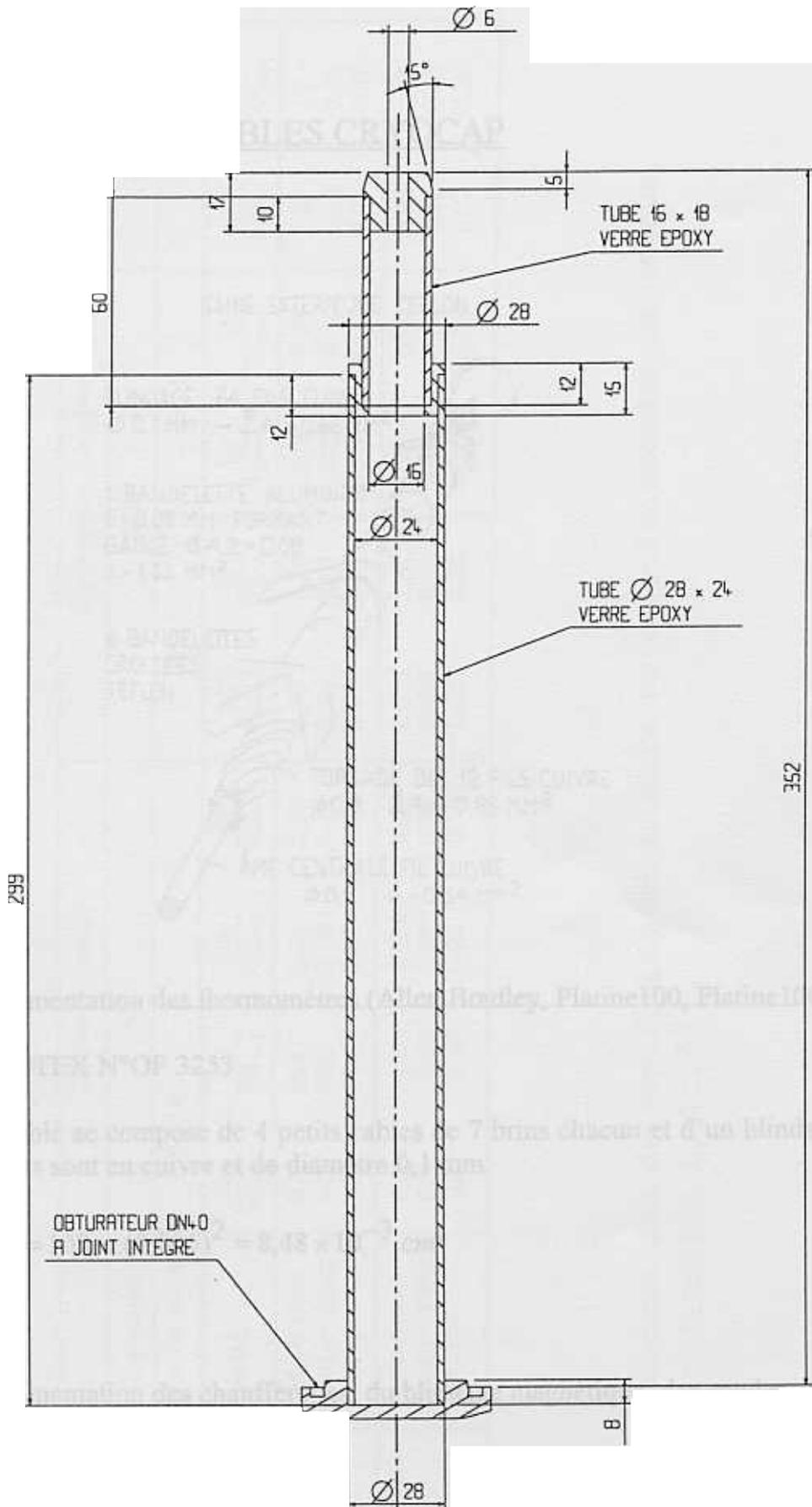
Le service de la documentation de l'Institut National de la Recherche Scientifique est à votre disposition pour toute information relative à ce document.

BASE DE DONNEES	PROFILS	12/81
TREUILLES	PROFILS	
MATIERE	PROFILS	
TTF CRYOSTAT DE CAPTURE		
TUBE FAISCEAU		
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN PHYSIQUE	INRS	SECAP
1223	1225	1225

ANNEXE A4.12



ANNEXE A4./4



DOIGT DE CENTRAGE

TTF CRYOCAP

SBT

SERVICE DES BASSES TEMPERATURES

Tel.: 69 41 72 80

CNRS - N2P3

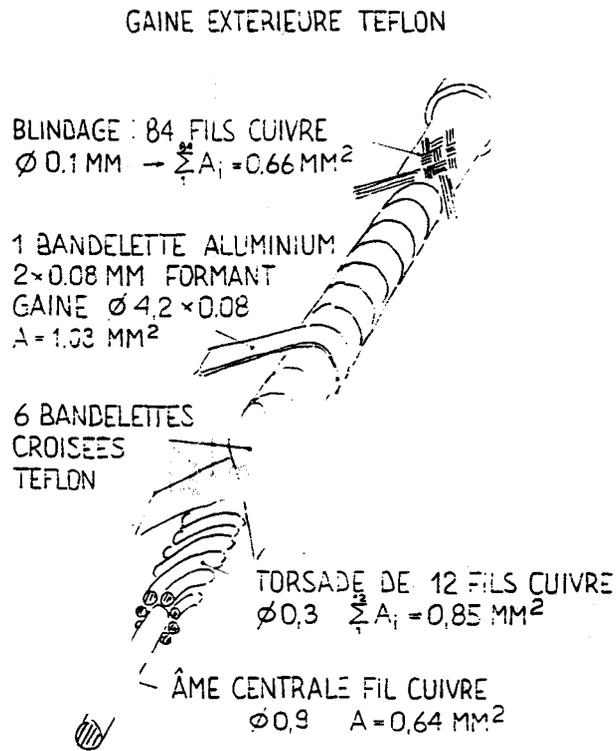


INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLEAIRE

94-06 ORSAY CEDEX N° Plan: 63-10-210 /

## CABLES CRYOCAP

### 1 Câbles H.O.M



Câbles d'alimentation des thermomètres (Allen Bradley, Platine 100, Platine 1000)

Ref : FILOTEX N°OF 3253

Chaque cable se compose de 4 petits cables de 7 brins chacun et d'un blindage de 80 brins. Les brins sont en cuivre et de diamètre 0,1 mm.

$$\Rightarrow S_{total} = 108 \cdot \pi \cdot (0,005)^2 = 8,48 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Câbles d'alimentation des chaufferettes, du blindage magnétique, des sondes, etc.

Ref : FILOTEX KZ 05-08/EF18-19

Chaque cable se compose de 20 brins en cuivre de 0,2 mm diamètres

$$\Rightarrow S_{total} = 20 \cdot \pi \cdot (0,01)^2 = 6,28 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Réfrigérant		Hélium liquide				Hydrogène liquide				Azote liquide	
Température finale du métal		4.2 K				20.4 K				77.3 K	
Température initiale du métal		300 K		77 K		300 K		77 K		300 K	
Utilisation de	métal	$\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{met}}}$	$\frac{\text{ltr}}{\text{kg}_{\text{met}}}$								
Chaleur d'évaporation	aluminium	8.3	66.4	0.4	3.20	0.38	5.35	0.018	0.25	0.81	1.0 *
	acier inox	4.2	33.6	0.18	1.44	0.2	2.82	0.0095	0.12	0.43	0.53
	cuivre	3.9	31.2	0.27	2.16	0.17	2.39	0.012	0.17	0.37	0.46
Chaleur d'évaporation et Chal. sensible	aluminium	0.2	1.60	0.028	0.22	0.075	1.07	0.0097	0.14	0.51	0.63
	acier inox	0.1	0.80	0.013	0.10	0.037	0.53	0.0045	0.06	0.27	0.33
	cuivre	0.1	0.80	0.02	0.16	0.037	0.53	0.0065	0.09	0.23	0.28

Consommation de cryofluide nécessaire au refroidissement de métaux  
(publication Leybold)

## **BIBLIOGRAPHIE**

TESLA-COLLABORATION

Tesla Test Facility Linac - Design report  
Version 1.0, March1, 1995 - p. 209

- [ 2 ] Technique de vissage - CETIM - Le 19 Octobre 1994  
Le serrage contrôlé pourquoi?  
par Raymond Souvignet - p. 5

TESLA-COLLABORATION

Contributions to the CEC/ICMC'95  
July 17-21, 1995 in columbus, Ohio - p. 43

R.R CONTE : Eléments de cryogénie - p. 202

